

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CURITIBA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EDUARDO MORAES SANTANA
SANDRA LIPINSKI

**ESTUDO DE REVESTIMENTOS METÁLICOS DEPOSITADOS POR ASPERSÃO
TÉRMICA CONTRA A CORROSÃO MARINHA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2018

EDUARDO MORAES SANTANA
SANDRA LIPINSKI

**ESTUDO DE REVESTIMENTOS METÁLICOS DEPOSITADOS POR
ASPERSÃO TÉRMICA CONTRA A CORROSÃO MARINHA**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica do Câmpus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Flávio de Oliveira Schiefler Filho

Co-Orientador: Prof. Me. Antônio Kozlik Junior

CURITIBA
2018

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "**ESTUDO DE REVESTIMENTOS METÁLICOS DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA CONTRA A CORROSÃO MARINHA**", realizado pelos alunos EDUARDO MORAES SANTANA e SANDRA LIPINSKI, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Marcos Flávio de Oliveira Schiefler Filho

DAMEC - UTFPR

Orientador

Prof. Me. Antonio Kozlik Filho

DAMEC - UTFPR

Co Orientador

Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova

DAMEC - UTFPR

Avaliador

Prof. Dr. Fábio Martins

DAMEC - UTFPR

Avaliador

Curitiba, 28 de junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos à Deus, por nos guiar em nossas decisões, nos prover condições para desempenharmos todo nosso potencial, e sempre estar ao nosso lado.

Agradecemos aos nossos familiares, por nos apoiar e acreditarem no nosso sucesso. Nossos orientadores, por nos auxiliarem durante esse projeto. À banca por ter aceito nosso convite, e enriquecer nosso trabalho com suas observações.

Durante as atividades desenvolvidas nesse projeto, contamos com a ajuda da Revesteel, onde o professor Edison Luiz Marge, diretor da empresa, nos auxiliou com as aspersões das amostras. Nos atendendo prontamente em sua empresa, fornecendo todos os recursos necessários para a atividade.

Também contamos com a ajuda do professor Julio Cesar Klein das Neves, que disponibilizou os recursos do laboratório de metalografia, nos ajudando com as análises em microscopia ótica, fundamentais para as discussões dos resultados.

Por fim, o professor Carlos Cruz, do Departamento Acadêmico de Química e Biologia da UTFPR, que nos auxiliou com as análises eletroquímicas, não medindo esforços para que atingíssemos nossos objetivos.

RESUMO

SANTANA, Eduardo M., LIPINSKI, Sandra. Estudo de revestimentos metálicos depositados por aspersão térmica contra a corrosão marinha. 73 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Revestimentos metálicos aspergidos termicamente para a proteção contra a corrosão possuem uma grande aplicabilidade industrial, pois além de oferecerem proteção catódica ou por barreira ao substrato, também são facilmente depositados em grandes superfícies. Os processos a chama convencional (FS, flame spraying) e a arco elétrico (AS, arc spraying) são utilizados em grande escala na indústria, porém comumente fornecem revestimentos que podem apresentar muitas descontinuidades, tais como poros, óxidos e trincas. Dentro desse contexto, o presente trabalho teve como principal objetivo comparar as características microestruturais e eletroquímicas de seis diferentes revestimentos anódicos de alumínio (Al) e zinco (Zn) depositados sobre substrato de aço carbono, a fim de determinar a sua resistência à corrosão em água marinha sintética e selecionar o melhor revestimento para aplicação em escala industrial. Para isso, foram realizados ensaios de medição de espessura, dureza, rugosidade, teor de poros e óxidos, monitoração do potencial de corrosão e polarização potenciodinâmica anódica. Foram produzidos corpos de prova de Al pelos processos FS e AS (comparação entre processos) e corpos de prova de Zn pelo processo FS (comparação entre materiais), variando-se o parâmetro pressão de ar comprimido. Os resultados indicaram que o revestimento que apresentou as melhores características de proteção do aço contra a corrosão foi o de zinco Aspergido pelo processo à chama convencional.

Palavras-chave: aspersão térmica, revestimentos anódicos, corrosão, microestrutura, ensaios eletroquímicos.

ABSTRACT

SANTANA, Eduardo M., LIPINSKI, Sandra. Study of metallic coatings deposited by thermal spraying process against marine corrosion. 70 p. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Mechanical Engineering Department, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Thermally sprayed metallic coatings for corrosion protection have a wide industrial applicability, because besides offering cathodic protection or by substrate barrier, it is also easily applied on large surfaces. Arc Spraying and Flame Spraying process are commonly used on a large scale in industry, but provide coatings that can exhibit many discontinuities, such as pores, oxides and cracks. In this context, the main objective of this work was to compare the microstructural and electrochemical characteristics of six different anodic coatings of aluminum (Al) and zinc (Zn) deposited on carbon steel substrate, in order to determine its corrosion resistance in synthetic marine water and to select the best coating for industrial scale application.

For this, measurements of thickness, hardness, roughness, pore and oxide content, corrosion potential monitoring and anodic potentiodynamic polarization were performed. Thus, Al test samples were produced by the FS and AS processes (process comparison) and Zn test samples by the FS process (materials comparison), by varying the parameter compressed air pressure. The results indicated that the coating that presented the best protection characteristics against corrosion was sprayed zinc by the conventional flame process.

Keywords: thermal spraying, anodic coatings, corrosion, microstructure, electrochemical tests.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Exemplo de corrosão uniforme	12
Figura 2 - Representação esquemática do processo de deposição de partículas por aspersão térmica. Fonte: Adaptado Schiefler (2004)	16
Figura 3 - Classificação dos processos de aspersão térmica, por meio de aquecimento	17
Figura 4 - Princípio do processo aspersão a Chama Convencional com Arame. Fonte: Wank (2017)	20
Figura 5 - Princípio do processo de aspersão a arco elétrico	21
Figura 6 – Ciclo de vida da corrosão para um produto metálico.	23
Figura 8 - Formas comuns de corrosão.....	24
Figura 9 - Série Galvânica para o aço carbono. Indicações em cinza escuro referem-se ao comportamento ativo para ligas ativo-passivas, enquanto a indicação em branco representa a posição relativa do aço carbono	27
Figura 10 – Representação esquemática da curva PPA com comportamento passivo (Ecol = potencial de colapso, E _{ap} = potencial de passivação primária).....	30
Figura 11 - Operador realizando a	33
Figura 12 - Dispositivo de fixação para aspersão das amostras	34
Figura 13 - Sentido de aplicação do	34
Figura 14 - Pistola de aplicação Metco	35
Figura 15 - Pistola de aplicação Metco para aspersão.....	36
Figura 16 - Vista transversal do corpo de prova AI_FS_1. Lente	38
Figura 17 - Corte transversal da amostra AI_FS_1. Curvas de área e comprimento para cálculo da espessura média.	39
Figura 18 - Área de interesse delimitada na amostra AI_FS_1 para cálculo.....	40
Figura 19 - Desenho esquemático da medição e cálculo do parâmetro Ra	41
Figura 20 - Equipamento utilizado para a medição de rugosidade.....	42
Figura 21 - (a) Esquema representativo do posicionamento das indentações para medição da dureza. (b) Representação do posicionamento das linhas diagonais para medição da indentação.	43
Figura 22 - Durômetro utilizado para.....	43
Figura 23 – Posição de fixação do corpo.....	45
Figura 24 – Componentes da célula de testes OCP e PPA	45
Figura 25: Esquema de montagem da célula de ensaio. (a) Função para monitoração do potencial de corrosão. (b) Função para monitoração da curva de polarização. Fonte: Adaptado de EG&G Princeton, 1987 e TAIT, W. S.(1994).....	46
Figura 26 - Cabos do potenciostato conectados aos	47
Figura 27 - Detalhe da rede de paládio utilizada como contra eletrodo	47
Figura 28 – Detalhe da área ensaiada pelo método PPA, amostra AI_FS_2. Produtos de oxidação formam uma mancha branca sobre a área.	52
Figura 29 - Detalhe da área ensaiada pelo método PPA, amostra AI_AS_2. Produtos de oxidação formam uma mancha branca sobre a área.	52
Figura 30 – Áreas ensaiadas por OCP e PPA. (a) AI_FS_1 (b) AI_FS_2 (c) AI_AS_1 (d) AI_AS_2 (e) Zn_FS_1 (f) Zn_FS_2	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores representativos de algumas condições operacionais disponibilizadas pelos	19
Tabela 2: Quantidade de amostras por tipo de revestimento e processo de aspersão	31
Tabela 3: Parâmetros utilizados no processo de jateamento abrasivo	32
Tabela 4: Parâmetros utilizados para a aspersão de alumínio no processo à chama convencional	35
Tabela 5: Parâmetros utilizados para a aspersão de alumínio no processo ao arco elétrico	36
Tabela 6: Parâmetros utilizados para a aspersão de alumínio no processo a chama convencional	37
Tabela 7: Resultados da caracterização microestrutural e propriedades mecânicas determinadas para os diversos revestimentos	49
Tabela 8: Potenciais de corrosão obtidos pelo ensaio OCP	51

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

- FS - Flame Spraying (aspersão a chama oxi-gás);
- AS - Arc Spraying (aspersão a arco elétrico);
- HVOF - High Velocity Oxy-Fuel (Aspersão a Chama de Alta Velocidade com Pó).
- HVCW - High Velocity Combustion Wire (Aspersão a Chama de Alta Velocidade com Arame).
- PS - Plasma Spraying (aspersão a plasma);
- D-gunTM - Detonation-Gun spraying (aspersão por detonação);
- LS - Laser Spraying (aspersão a laser);
- CS - Cold Spraying (aspersão a frio).
- Ecorr – Potencial de corrosão
- OCP – (Open Circuit Potential – Potencial de Circuito Aberto)
- PPA - Polarização Potenciodinâmica Anódica
- Ecol - potencial de colapso,
- Epap - potencial de passivação primária
- HV1 – dureza Vickers

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	JUSTIFICATIVA	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	DEFINIÇÃO E MECANISMOS DE FORMAÇÃO DOS REVESTIMENTOS	16
2.2	CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA	17
2.2.1	Aspersão a Chama Convencional com Arame (Flame Spray, FS)	19
2.2.2	Aspersão a Arco Elétrico (Arc Spraying, AS)	20
2.2.3	Espessura de Revestimento	21
2.2.4	Porosidade	21
2.3	CORROSÃO	22
2.3.1	Corrosão pela atmosfera	25
2.3.2	Corrosão pelo solo	26
2.3.3	Corrosão em ambiente marinho	26
2.4	COMPORTAMENTO DOS REVESTIMENTOS	26
2.5	ANÁLISES ELETROQUÍMICAS	28
2.5.1	Monitoração do Potencial de Corrosão (Ecorr x Tempo)	29
2.5.2	Polarização Potenciodinâmica Anódica (PPA)	29
3	PROCEDIMENTOS E EXPERIMENTOS	31
3.1	MATERIAIS DE REVESTIMENTO	31
3.2	PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	31
3.3	PREPARAÇÃO METALOGRAFICA	37
3.4	CARACTERIZAÇÃO MICRO E MACRO ESTRUTURAL	38
3.4.1	Microscopia Ótica	38
3.4.1.1	Medição da espessura do revestimento	38
3.4.1.2	Medição da porosidade mais óxidos	40
3.4.2	Medição da rugosidade	41
3.5	CARACTERIZAÇÃO DA PROPRIEDADE MECÂNICA – DUREZA	42
3.6	CARACTERIZAÇÃO ELETROQUÍMICA	44
3.6.1	Monitoramento do potencial de corrosão (OCP)	44
3.6.2	Monitoramento da polarização (PPA)	46
4	RESULTADOS	49
4.1	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E PROPRIEDADES DO REVESTIMENTO	49
4.2	CARACTERIZAÇÃO ELETROQUÍMICA	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	55
	REFERÊNCIAS	56
	APÊNDICE A – GRÁFICO OCP PARA AL_FS_1	60
	APÊNDICE B – GRÁFICO OCP PARA AL_FS_2	61
	APÊNDICE C – GRÁFICO OCP PARA AL_AS_1	62
	APÊNDICE D – GRÁFICO OCP PARA AL_AS_2	63
	APÊNDICE E – GRÁFICO OCP PARA ZN_FS_1	64
	APÊNDICE F – GRÁFICO OCP PARA ZN_FS_2	65
	APÊNDICE G – GRÁFICO OCP PARA TODAS AS AMOSTRAS	66
	APÊNDICE H – GRÁFICO PPA PARA AL_FS_1	67
	APÊNDICE I – GRÁFICO PPA PARA AL_FS_2	68
	APÊNDICE J – GRÁFICO PPA PARA AL_AS_1	69
	APÊNDICE K – GRÁFICO PPA PARA AL_AS_2	70

APÊNDICE L – GRÁFICO OCP PARA ZN_FS_1	71
APÊNDICE M – GRÁFICO PPA PARA ZN_FS_2	72
APÊNDICE N – GRÁFICO PPA PARA TODAS AS AMOSTRAS	73

1 INTRODUÇÃO

De modo geral, a corrosão é um fenômeno de interface espontânea e irreversível que provoca a transformação de um metal através de sua interação química ou eletroquímica com o meio em que se encontra, podendo estar ou não aliada a esforços mecânicos e ainda ser induzida pela presença de bactérias (GEMELLI, 2001). O processo de corrosão pode se apresentar de diversas maneiras na superfície dos materiais metálicos, tais como: a) uniforme; b) galvânica; c) puntiforme (por pites ou alveolar); d) por frestas (“crevice corrosion”); e) intergranular; f) lixiviação seletiva de elemento de liga (“dealloying”); g) corrosão- erosão e, h) corrosão sob tensão (JONES, 1996; CALLISTER JR, 1994; SCHATT, 1996; FONTANA, 1986). Um exemplo de corrosão uniforme pode ser observado na Figura 1, referente à escada de acesso ao trapiche na Ilha de São Paulo, na Bahia.



Figura 1 Exemplo de corrosão uniforme em uma escada exposta a ambiente marinho. Fonte: Fotografia do acervo do PO (2017).

Com o objetivo de buscar a minimização dos efeitos do processo corrosivo, no início do século XX, a aspersão térmica foi desenvolvida pelo engenheiro suíço M. U. Schoop - Schoop & Guenther, 1917 – (PAWLOWSKI, 1995). Basicamente, ela promove a deposição particulada de materiais metálicos ou não-metálicos sobre substratos previamente preparados (KREYE, 1999). No princípio, esta técnica limitou-se à deposição de revestimentos resistentes à corrosão a base de zinco (Zn) e, posteriormente, passou a aspergir, também, revestimentos a base de metal duro (WC+Co – carboneto de tungstênio + cobalto), com vistas à obtenção também de resistência ao desgaste. O desenvolvimento desta técnica que, mais tarde, se mostrou bastante versátil ao englobar uma gama variada de processos de revestimento, foi responsável por grandes avanços no setor naval e na indústria de petróleo e gás.

Por definição, aspersão térmica trata da aceleração de partículas de material de revestimento fundidas, por uma pistola de pulverização, usando um gás a alta velocidade, sobre um material base previamente preparado. Para a preparação da superfície usualmente utilizam-se os processos de jateamento de areia e desengraxe. As partículas que saem da pistola de pulverização, pouco acima da temperatura de fusão, aderem e se sobrepõem à superfície do material base criando um revestimento (SWIFT, 2014).

Os revestimentos metálicos aplicados a fim de minimizar os efeitos da corrosão em metais podem ser divididos em dois grupos. O primeiro deles são os revestimentos com aplicação de metais mais ativos que o substrato, este mecanismo oferece proteção catódica, onde a corrosão preferencial do revestimento impede a corrosão do substrato. Destacam-se para esta aplicação metais como alumínio e zinco. O segundo grupo caracteriza-se pela aplicação de um revestimento com metais mais nobres que o substrato, este mecanismo oferece uma barreira mecânica à passagem do eletrólito, uma vez que o metal aplicado como revestimento possui alta resistência à corrosão. Para esta aplicação destacam-se metais como níquel, cobalto e cromo (BRANDOLT, 2017).

Atualmente, os revestimentos aspergidos termicamente possuem grande aplicação industrial, são utilizados não somente na prevenção da corrosão, mas também para minimizar efeitos de desgaste, isolamento térmico e elétrico, operações de restauração dimensional. Destaca-se, também, a área da saúde, com aplicações em próteses, afim de melhorar a aderência do implante no tecido humano e promover

a inserção de propriedades especiais no material de base. (PAWLOWSKI, 1995; UREVICH, 2000; HOWES, 1994; SAMPSON, 1993; HEINRICH, 1992).

1.1 OBJETIVOS

A presente pesquisa teve como objetivo principal, determinar qual material de revestimento, zinco ou alumínio, aspergidos pelos processos chama convencional e arco elétrico é melhor frente à corrosão marinha. Para alcançar esse objetivo os seguintes objetivos secundários foram atingidos:

- Determinar o potencial de corrosão das amostras analisadas;
- Analisar a tendência à passivação dos revestimentos analisados.

E, com a finalidade de entender melhor os fenômenos envolvidos, ensaios de rugosidade, dureza e espessura foram efetuados.

1.2 JUSTIFICATIVA

A área de pesquisa abordada provém do interesse dos proponentes em estudar assuntos relacionados à indústria, e também ao fato da corrosão e sua proteção serem temas amplos para se trabalhar nesse cenário, pois envolvem áreas de produção, projeto, materiais, administração e economia, dentre outras. Para ilustrar o envolvimento de diferentes áreas da indústria na temática corrosão, segue a apresentação de um exemplo desta multidisciplinaridade. Revestimentos metálicos termicamente aspergidos, combinados com revestimentos de pintura, permitem uma vida sem manutenção entre 20 e 40 anos, enquanto que superfícies apenas protegidas por pinturas resistem não mais que 5 anos, sem necessitarem de manutenção na camada protetora. Este aumento da vida de equipamentos, entre manutenções, representa economia e favorece as empresas ligadas aos setores de

petróleo e gás, naval. (KHANNA, 1998) Uma vez que os equipamentos e estruturas utilizados na indústria naval são de grande porte e, muitas vezes, de difícil acesso para a realização de manutenções periódicas, levanta-se a necessidade de estudos relacionados à corrosão, pois falhas oriundas da indústria naval resultam em catástrofes ambientais. Para que fosse possível essa evolução, um avanço tecnológico e investimentos em pesquisa sobre esses revestimentos foi preciso e deve dar-se continuidade. A partir disso, percebe-se a necessidade de pesquisas sobre qualidade e eficiência de revestimentos aspergidos termicamente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DEFINIÇÃO E MECANISMOS DE FORMAÇÃO DOS REVESTIMENTOS

Durante o processo de aspersão térmica o material de revestimento passa no interior da pistola de aplicação, e por meio de gases a alta pressão o material é aquecido e aspergido sobre o substrato previamente preparado, em forma particulada. Ao se chocarem com o substrato, essas partículas se tornam aplainadas, como finas plaquetas (ou “panquecas”), que se conformam e aderem ao material de base, bem como umas nas outras (HOWES, 1994; PAWLOWSKI, 1995). A Figura 2 ilustra, de forma esquemática, como o processo se desenvolve.

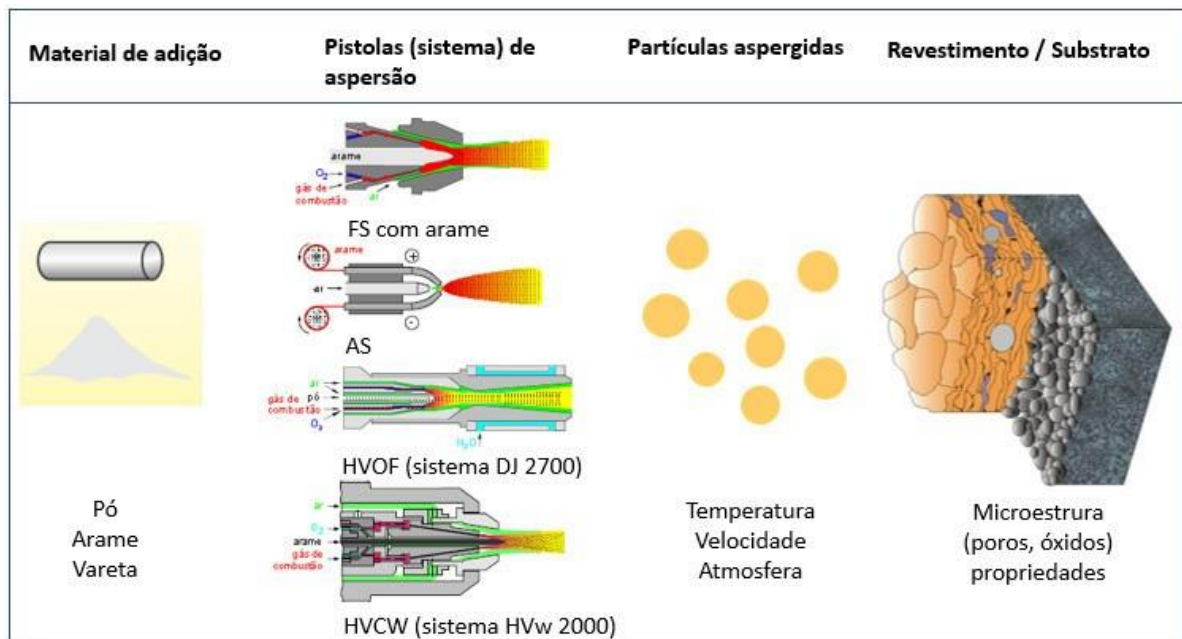


Figura 2 - Representação esquemática do processo de deposição de partículas por aspersão térmica. Fonte: Adaptado Schiefler (2004)

A forma de aplicação à qual o revestimento estará sujeito deve ser estudada e selecionada com cuidado, pois, como pode ser observada no esquema da Figura 2, a deposição de partículas está sujeita à presença de poros, óxidos e trincas, influenciando diretamente no desempenho em serviço (SCHIEFLER Fo, 2004).

2.2 CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA

Os processos de aspersão térmica podem ser classificados por modos diferentes, sendo que os mais usuais são: tipo de material de deposição, método de projeção das partículas, regime de operação e meio de aquecimento (McCUNE, 1995; PAWLOWSKI, 1995; PAPST, 1993; MUSIL, 1997). Para apresentação dos processos neste estudo, julgou-se o meio de aquecimento o mais adequado. A Figura 3 apresenta um fluxograma com esta classificação.

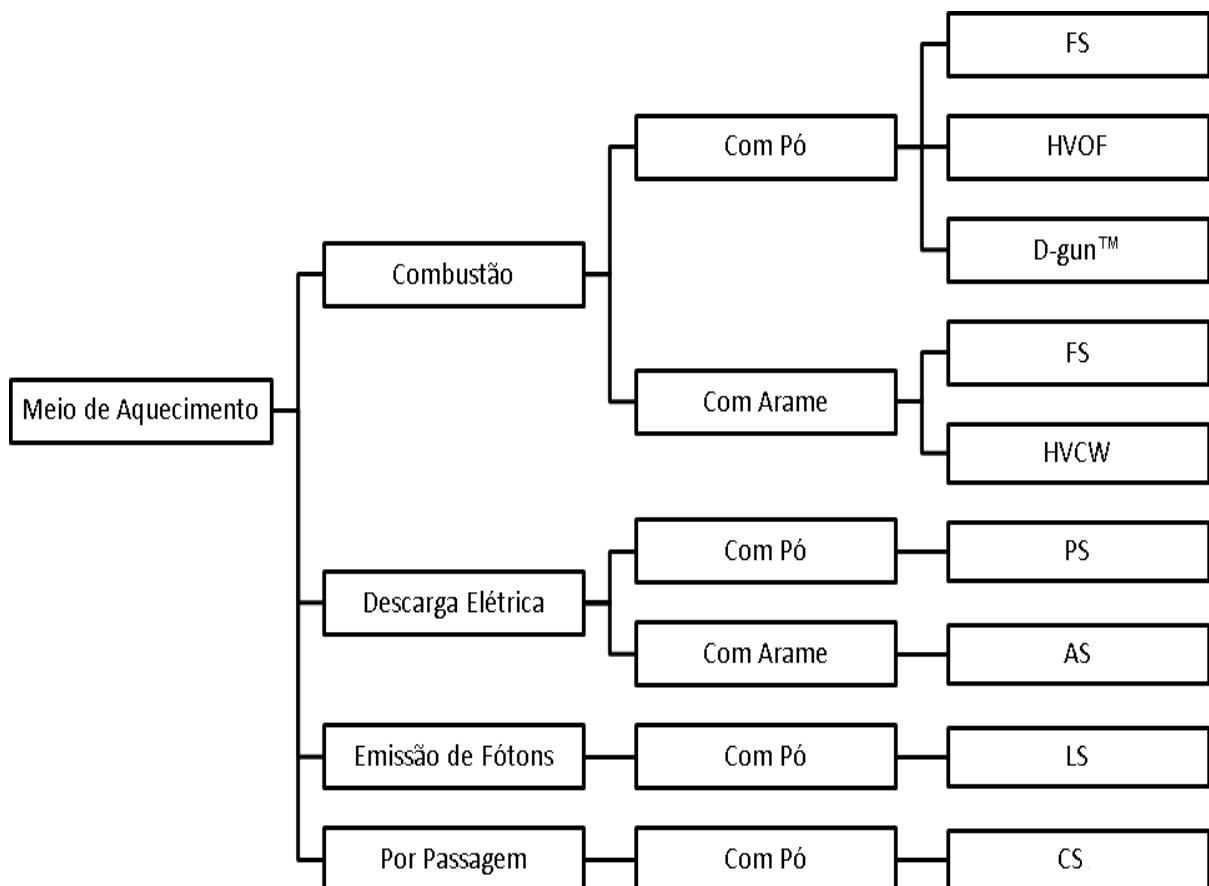


Figura 3 - Classificação dos processos de aspersão térmica, por meio de aquecimento.
 Fonte: Adaptado Schiefler (2004)

As siglas da Figura 3 estão descritas abaixo:

- FS = Flame Spraying (aspersão a chama oxi-gás);
- AS = Arc Spraying (aspersão a arco elétrico);
- HVOF = High Velocity Oxy-Fuel (Aspersão a Chama de Alta Velocidade com Pó).
- HVCW = High Velocity Combustion Wire (Aspersão a Chama de Alta Velocidade com Arame).
- PS = Plasma Spraying (aspersão a plasma);
- D-gunTM = Detonation-Gun spraying (aspersão por detonação);
- LS = Laser Spraying (aspersão a laser);
- CS = Cold Spraying (aspersão a frio).

Nos processos de aspersão térmica está compreendida uma grande gama de parâmetros que podem ser ajustados, conforme a necessidade. Alguns desses parâmetros são: o tipo de gás de combustão, a razão gás de combustão/oxigênio, a distância de aspersão, o diâmetro e a velocidade de avanço do arame, o tipo de gás de arraste, a distribuição granulométrica do pó, a taxa de alimentação do pó, o número de passes, assim como a corrente e o potencial elétrico (HOWES, 1994; LIMA, 2002).

Na **Tabela 1**, a seguir, pode ser visto como os parâmetros relacionados à energia térmica e à energia cinética variam conforme o método utilizado. Observa-se uma ampla variação entre os parâmetros dos processos de aspersão térmica. Os processos mais novos tendem a diminuir a temperatura de chama (utilizando menos energia térmica), e aumentar a velocidade das partículas (aumentando a energia cinética).

Tabela 1: Valores representativos de algumas condições operacionais disponibilizadas pelos principais processos de aspersão térmica (SCHIEFLER Fo, 2004)

Processo	Temperatura da Chama ou Arco (°C)	Velocidade das Partículas (m/s)	Taxa de Deposição (kg/h)	Gases (¹)
FS (²)	≤ 3160	≤ 50	1 - 6	Acetileno, propano, propileno, CO ₂ , H ₂ , O ₂ , ar
FS (³)	≤ 3160	≤ 200	6 - 12	
AS	≈ 4000	≈ 150	8 - 20	Ar, N ₂
HVOF	≤ 3160	≤ 650	2 - 18	etileno, propano, propileno, acetileno, querosene (⁴), H ₂ , O ₂ , CO ₂ , ar
HVCW	≤ 3160	≤ 300	2 - 8	Idem ao anterior
PS	≤ 16000	≤ 450	4 - 8	Ar, He, N ₂ , H ₂ e suas misturas, CO ₂
D-gun™	> 3160	≈ 600	3 - 6	Acetileno, O ₂ , ar
LS	> 10000	> 1	1 - 2	CO ₂ , He, N ₂ , Ar e suas misturas
CS	≤ 600	550 - 1000	4 - 8	Ar, He, N ₂ e suas misturas

(¹) Gases utilizáveis em cada processo; (²) Com pó; (³) Com Arame; (⁴) Combustível líquido, usado em sistema específico do processo HVOF

2.2.1 Aspersão a Chama Convencional com Arame (Flame Spray, FS)

O processo a chama convencional FS utiliza energia química para combustão de uma chama oxi-gás, energia utilizada para fundir a ponta de um arame ou pó, e o ar comprimido é o responsável por atomizar as partículas fundidas e impulsionar as gotículas em direção ao substrato. Quando comparada com processos mais atuais, como HVOF e HVCW, a velocidade de propulsão do processo FS é menor, o que torna o tempo para percorrer a distância entre a ponta do sistema de aspersão e o substrato maior, tornando as partículas mais suscetíveis à oxidação e, conseqüentemente, gerando um maior teor de óxidos nos revestimentos e aumentando o grau de porosidade (SCHIEFLER Fo, 2004). A Figura 4 esquematiza o funcionamento de um sistema de aspersão térmica FS.

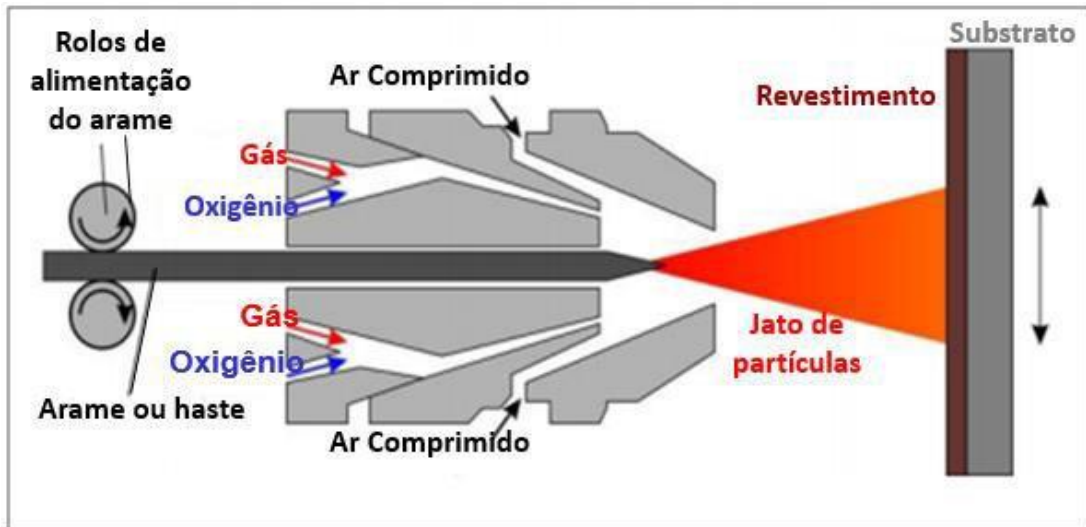


Figura 4 - Princípio do processo aspersão a Chama Convencional com Arame.
Fonte: Wank (2017)

2.2.2 Aspersão a Arco Elétrico (Arc Spraying, AS)

O processo de aspersão térmica a arco elétrico (AS) dispõe de um arco elétrico como fonte para fundir o metal base, o que resulta no alcance de temperaturas mais elevadas que o processo FS, conseguindo obter taxas de deposição maiores (WELDING HANDBOOK, 1991; CLARE, 1982). Porém, as velocidades estão na mesma faixa que as do processo FS e, tendo em vista a maior temperatura, as partículas são mais irregulares, gerando, conseqüentemente, revestimentos mais heterogêneos, aumentando, também, o número de poros (SCHIEFLER Fo, 2004).

O processo de Arc Spraying (AS) é basicamente composto por: uma pistola de spray utilizada para receber o arame e aspergir o revestimento no substrato; compressor de ar para acelerar as partículas do revestimento; equipamento de aspersão AS - responsável por fornecer corrente ao arame proporcionando a abertura arco elétrico. O fluxo de arame e gases está esquematizado na Figura 5 a seguir.

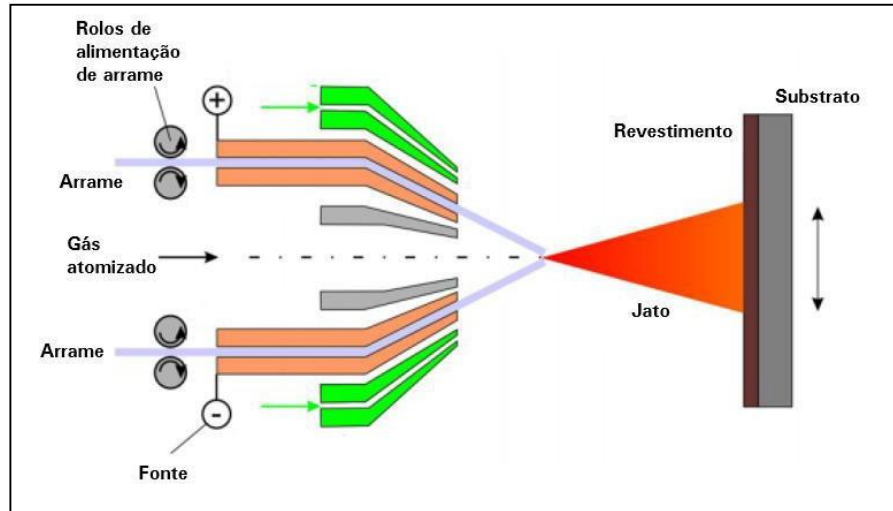


Figura 5 - Princípio do processo de aspersão a arco elétrico.
Fonte: WANK (2017)

2.2.3 Espessura de Revestimento

De acordo com Maranhão (2006), “a espessura total é obtida pelo número de passes, considerando a velocidade relativa pistola-peça e o fluxo de material.”, ou seja, mantendo-se os parâmetros de aspersão constantes, variando apenas o número de passes de revestimento, ou o fluxo de material, a espessura irá variar. Para Round (1989), para se obter camadas mais densas, é sugerido poucos passes, com velocidades menores e fluxos de material maiores durante a aspersão.

2.2.4 Porosidade

Segundo Somolev (1994), os poros formados em revestimentos obtidos por aspersão térmica podem ser divididos em dois grandes grupos: Poros grandes, formados entre lamela/substrato e lamela/lamela e poros pequenos formados dentro de lamelas.

Somolev (1994) ainda explica que, a formação desses poros está relacionada

com a temperatura, viscosidade das partículas fundidas, entre outros fatores. Além de, baixas temperaturas e/ou velocidade de impacto, assim como partículas grandes tendem a aumentar a porosidade.

Em outro estudo, Hearley et al (2000), confirma essa relação de proporcionalidade inversa entre temperatura e teor de poros. Notou-se que, quanto maior a temperatura e velocidade das partículas, menor o teor de poros.

2.3 CORROSÃO

Segundo o autor Vicente Gentil (1996), pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, podendo ou não estar aliada à atuação de esforço mecânicos. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional retrata alterações prejudiciais ou indesejáveis, sofridas pelo material, como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, o que torna o material inadequado para uso (GENTIL, 1996).

Neste trabalho, o tema corrosão será abordado como um processo de transformação do material, uma vez que nem todos os processos de corrosão são indesejáveis ou danosos. Pode-se citar como exemplos benéficos de corrosão: os sistemas de proteção catódica com matérias de sacrifício, a corrente gerada por pilhas e baterias não recarregáveis e processos de gravação em materiais (SCHIEFLER Fo, 2004). E também, aspectos decorativos de estruturas de bronze, oxidação de aços inoxidáveis, com formação da película protetora de óxido de cromo, Cr_2O_3 , fosfatização de superfícies metálicas para permitir melhor aderência de tintas (GENTIL, 1996).

A corrosão é um processo natural onde os materiais se combinam e reagem com outros elementos químicos, a fim de retornar ao seu estado de menor energia, (ASM, 2000, p. 1). A Figura 6 apresenta o ciclo de corrosão para um material metálico, ilustrando a teoria de que os materiais buscam sempre o seu menor estado de energia,

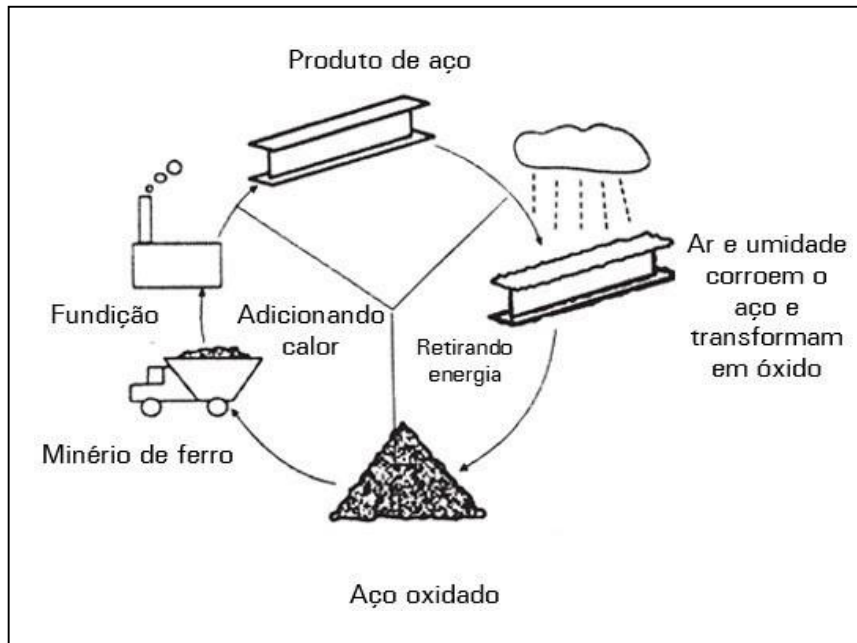


Figura 6 – Ciclo de vida da corrosão para um produto metálico.
Fonte: ASM (2000)

Esta teoria é também demonstrada esquematicamente na Figura 7 abaixo, onde é mostrada a interação química ou eletroquímica e, como produto da reação, a liberação de energia.

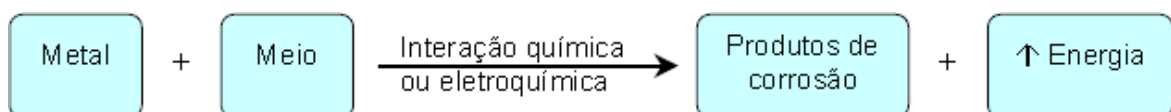


Figura 7 - Representação esquemática da reação de corrosão.
Fonte: LAFRAIA (2001)

A corrosão é classificada de acordo com os seguintes fatores:

- Natureza do meio: para a corrosão úmida é necessário um líquido ou umidade para a formação da corrosão, ou seca onde usualmente a reação envolve gases em altas temperaturas.
- Mecanismo de corrosão: eletroquímica ou reação química direta.
- Aparência da região corroída: a corrosão pode apresentar-se de forma uniforme ou localizada afetando apenas algumas regiões da superfície do material.

A classificação por aparência é amplamente utilizada para as análises de falhas, utilizando-se de uma verificação visual a olho nu ou com auxílio de um microscópio com o intuito de identificar a morfologia ou aparência da região corroída, através desta técnica é possível a identificação de tipos distintos de corrosão (ASM, 2000):

- Uniforme: Se processa em toda a extensão e de forma contínua na superfície do material;
- Puntiforme ou por pite: Se processa em pequenos pontos ou áreas localizadas;
- Fendas;
- Galvânica;
- Erosão;
- Intergranular;
- Lixiviação seletiva de elementos de liga;
- Trincas.

A Figura 8 representa, esquematicamente, alguns tipos de corrosão citados acima e que podem ser identificados visualmente.

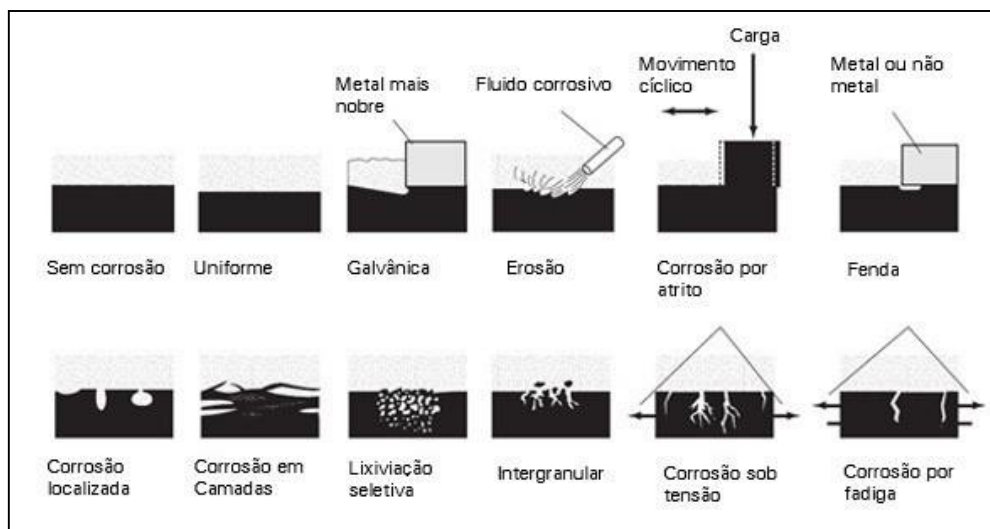


Figura 8 - Formas comuns de corrosão.
Fonte: ASM (2000)

As formas mais comuns da ocorrência da corrosão em aços carbono são:

corrosão uniforme, corrosão galvânica e corrosão por fenda. O ataque uniformemente distribuído por grandes regiões de superfície metálica é o mais comum, podendo ser controlado pela escolha do material base ou método de proteção à superfície (PANNONI, 2018). A corrosão galvânica ocorre quando dois metais diferentes, em contato elétrico, são expostos a um meio condutivo, a diferença de potencial é responsável pela manutenção do processo corrosivo (PANNONI, 2018). Frestas nas superfícies formam condições de um ambiente mais corrosivo do que os encontrados na superfície, sendo foco de corrosões localizadas (PANNONI, 2018).

2.3.1 Corrosão pela atmosfera

Geralmente, a corrosão tem como suas principais causas a umidade e os íons cloreto e/ou compostos de enxofre em concentrações suficientemente altas na atmosfera e é o principal problema para estruturas de aços carbono (CARNEIRO, 2010). Esses íons chegam a atmosfera por diferentes meios, como pelo mar, sal utilizado no degelo de ruas e estradas, de modo que gera um ambiente propício para as reações eletroquímicas envolvidas na corrosão.

A corrosão atmosférica pode se dar, também, por meio de substâncias que retêm umidade na superfície do metal, deposição de material metálico, criando pilhas de eletrodos diferentes, gases contaminantes como CO, CO₂, SO₂ (RIELLA, 2018).

Os diferentes ambientes podem proporcionar meios mais ou menos corrosivos, sendo os fatores que influenciam na ação corrosiva da atmosfera: umidade relativa, substâncias poluentes, temperatura, tempo de permanência do filme eletrólito na superfície do material (KOZLIK, 2007). A atmosfera corrosiva é classificada de acordo com as suas características e podem ser divididas nos seguintes ambientes: Rural, Urbano, Industrial Marinho e Marinho Industrial (PANOSSIAN, 1993). Para a corrosividade atmosférica pode-se utilizar a norma NBR14643 (ABNT, 2001) classifica os meios de acordo com a sua agressividade.

2.3.2 Corrosão pelo solo

A corrosão no solo acontece da mesma maneira que na atmosfera. Com reações eletroquímicas predominantes, a oxidação do metal acontece passando a íons em solução, principalmente devido a diferenças de concentração de oxigênio e sais, sua agressividade depende da composição do solo e da permeabilidade quanto a água e ar (PONTE, 2003).

2.3.3 Corrosão em ambiente marinho

A água do mar é o ambiente mais corrosivo dos meios naturais, sendo uma solução salina consistindo, predominantemente, de cloreto de sódio e magnésio dissolvidos em água (PONTE, 2003). A água do mar contém cerca de 3,4% de sais dissolvidos e é levemente alcalina, pH aproximadamente 8,0, o que a torna um eletrólito muito bom, favorecendo corrosão galvânica e em frestas. De acordo com Ponte (2003), a intensidade da corrosão varia de acordo com a velocidade a água e dos organismos biológicos presentes na nela.

2.4 COMPORTAMENTO DOS REVESTIMENTOS

A Figura 9, a seguir, apresenta uma Série Galvânica em Água do Mar, que adota como referência o aço carbono (material do substrato) e posiciona uma variada gama de metais e ligas metálicas com relação ao seu comportamento, se anódico (lado esquerdo ao aço baixo carbono) ou catódico (lado direito ao aço baixo carbono), em função do potencial de corrosão gerado no par galvânico (valores da abcissa do diagrama). Ou seja, materiais de revestimento que estão abaixo do aço carbono, por serem menos nobres que a referência, irão corroer preferencialmente, servindo como metal de sacrifício. Por outro lado, materiais de revestimento que estão acima são mais nobres e exercerão a chamada “proteção por barreira”.

Entretanto, só protegerão de fato o substrato se efetivamente se tornarem impermeáveis ao eletrólito. Caso contrário, a corrosão do substrato será bastante severa.

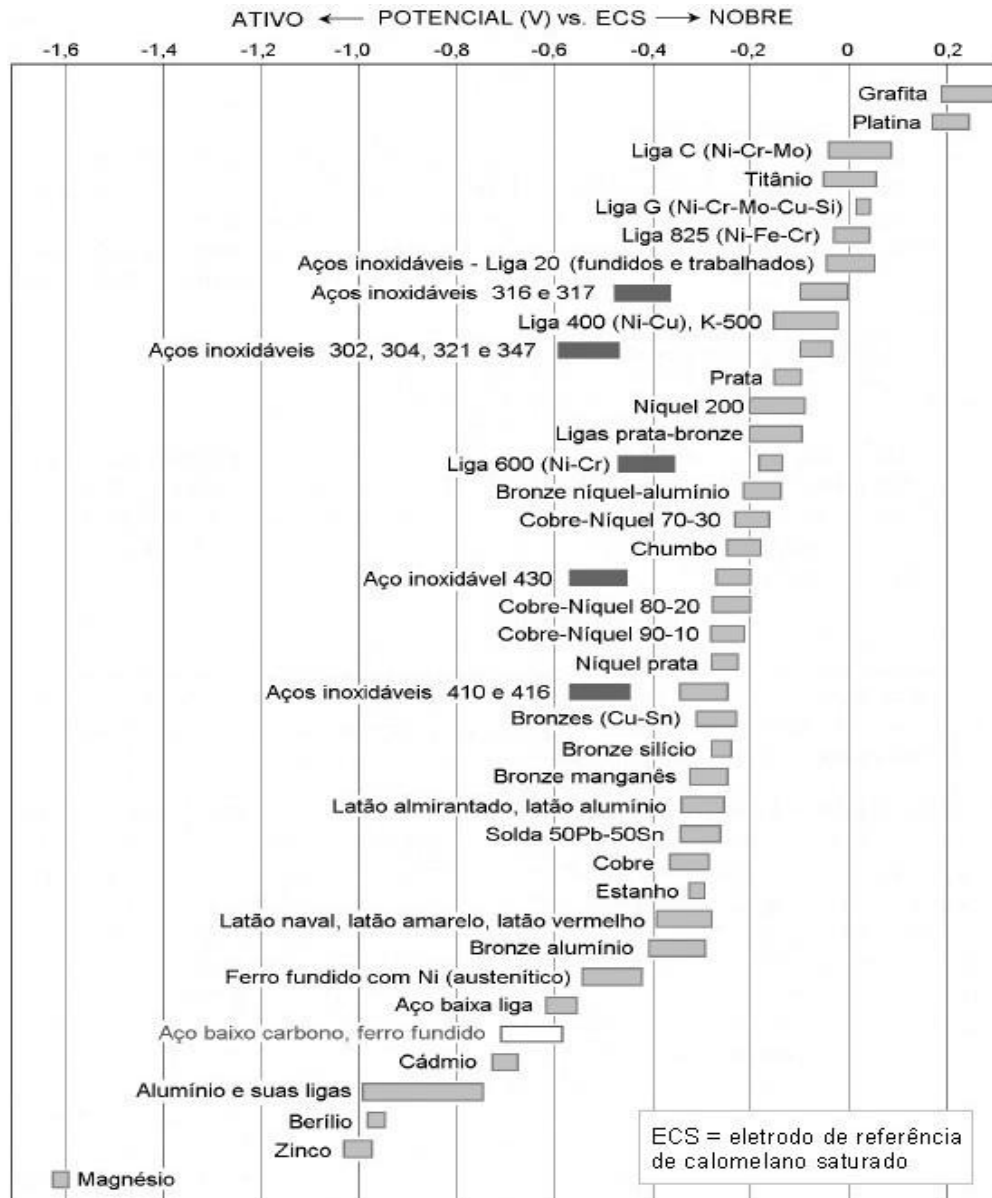


Figura 9 - Série Galvânica para o aço carbono. Indicações em cinza escuro referem-se ao comportamento ativo para ligas ativo-passivas, enquanto a indicação em branco representa a posição relativa do aço carbono. Fonte: Schiefler (2004).

A série galvânica apresentada na figura 7 foi construída com base na diferença de potencial relativa ao eletrodo de referência de Calomelano Saturado (Hg_2Cl_2), porém, neste trabalho os ensaios eletroquímicos foram realizados com eletrodo de Prata/Cloreto de prata (Ag/AgCl), o que não impacta na descrição dos resultados,

pois os valores para as duas referências são proporcionais. Caso se faça necessário a conversão dos valores, a literatura sugere a seguinte equação, $E \text{ vs } \text{Hg}_2\text{Cl}_2 = E \text{ vs } \text{Ag}/\text{AgCl} - 44 \text{ [mV]}$ (SCHIEFLER, 2004).

2.5 ANÁLISES ELETROQUÍMICAS

Para caracterizar a corrosão são utilizados ensaios eletroquímicos com equipamentos muito sensíveis, capazes de produzirem pequenas variações de tensão e ler baixas variações de densidade de corrente de corrosão ($J \text{ [A/cm}^2\text{]}$). Por exemplo, o efeito teórico da ação de uma densidade de corrente de corrosão de apenas $3 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$ sobre o ferro representa uma perda de massa de aproximadamente $1,1 \times 10^{-5}$ gramas, depois de 5 meses. Esse dano surge como um minúsculo ponto de ferrugem sobre a superfície do metal, do tamanho da ponta de um alfinete. Se por um lado, essa quantidade de produto de corrosão não altera a massa do metal e é muito difícil de ser observada, por outro lado ela pode ser facilmente medida (como uma corrente elétrica) em um equipamento eletrônico (SCHIEFLER Fo, 2004).

De forma geral, esses ensaios utilizam da própria natureza eletroquímica dos processos de corrosão para obterem seus resultados (TAIT, 1994). Os ensaios consistem no seguinte: uma fonte de potência externa polariza o corpo de prova de interesse, imerso no eletrólito, cujo corpo de prova é denominado *eletrodo de trabalho* ou de teste. A excitação provoca o desequilíbrio na interface metal/eletrólito, o que gera um fluxo de corrente que pode ser medida. Essa corrente resultante - pode ser anódica, quando o metal é polarizado no sentido positivo a partir de seu potencial de corrosão (E_{corr}), ou catódica, quando a polarização ocorre no sentido oposto - flui através de um eletrodo inerte, denominado *contra eletrodo*. Portanto, a monitoração da variação da tensão aplicada com a corrente gerada, permite estimar a resistência a corrosão de um metal ou liga metálica em um determinado eletrólito, pois mede a taxa de reação do eletrodo expressa como uma densidade de corrente. (JONES, 1996).

Quando o corpo de prova possui um revestimento aspergido, nenhuma técnica de ensaio individual é capaz de determinar, com confiança, a resistência à corrosão

da peça (FORSÉN, 1992). São necessários testes complementares para uma análise completa do fenômeno.

2.5.1 Monitoração do Potencial de Corrosão (Ecorr x Tempo)

Parâmetro mais simples de ser medido para um metal específico quanto a resistência à corrosão, denominado Potencial em Circuito Aberto (OCP – *Open Circuit Potential*) (TAIT et al. 1994).

Após exposição do metal ao eletrólito ocorre variação de potencial ao longo de um determinado período, com o objetivo de se obter o potencial em que as trocas eletroquímicas se estabilizam entre revestimento e eletrólito (SCHIEFLER, 2004).

A tendência é que a tensão (Ecorr) aumente, com o início do ensaio, caracterizado pela formação de um filme passivo, que protege o substrato contra corrosão (TAIT, 1994).

2.5.2 Polarização Potenciodinâmica Anódica (PPA)

Um ensaio de PPA utiliza uma faixa de Ecorr que se inicia, exatamente, no potencial de corrosão, ou logo abaixo dele, até um potencial suficientemente alto para causar a oxidação do material. Essa varredura acontece a uma taxa entre 0,1 e 5,0 mV/s (para dados mais confiáveis procura-se usar taxas mais lentas) (TAIT, 1994).

Para o ensaio de PPA são utilizados 3 eletrodos: referência, trabalho e contra eletrodo. Os resultados são compostos pela variação de diferença de potencial entre o eletrodo de trabalho/eletrólito, e eletrodo de referência/eletrólito, com o contra eletrodo servindo para medir a corrente gerada pela variação da diferença de potencial (SCHIEFLER Fo, 2004).

O formato da curva apresentada na Figura 10 é uma referência direta do comportamento à corrosão do material. Através da análise desta curva é possível

verificar se o material irá passivar ou não, é possível verificar valores críticos de E_{corr} e corrente, dados importantes para analisar a possível corrosão de um material (EG&G, 1987).

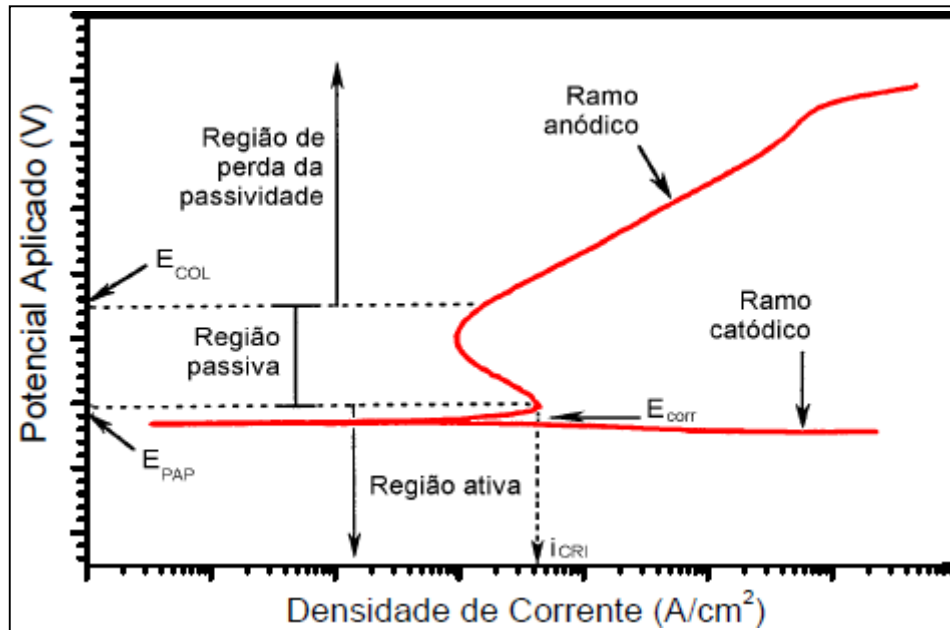


Figura 10 – Representação esquemática da curva PPA com comportamento passivo (E_{col} = potencial de colapso, E_{pap} = potencial de passivação primária).

Fonte: Adaptado de TAIT (1994).

3 PROCEDIMENTOS E EXPERIMENTOS

3.1 MATERIAIS DE REVESTIMENTO

Para a realização deste trabalho foram utilizados na produção de amostras os seguintes revestimentos protetores: alumínio (0,9Al – arame com 2,31mm de diâmetro) (METCO, 2000) e zinco (0,99Zn – arame com 2,31mm de diâmetro) (METCO, 2000). A escolha desses materiais para revestimento partiu da intenção em se estudar revestimentos anódicos. Os métodos de aspersão, FS e AS, derivaram dessa escolha, por conta da qualidade de aspersão que não favorecem revestimentos catódicos, por esses materiais exigirem uma cobertura perfeita da superfície. E, também, devido à disponibilidade dessa matéria prima por parte do fornecedor de aspersão térmica.

3.2 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para produção dos corpos de prova aspergidos, foi utilizado um aço baixo carbono, em chapas de 70 x 50 x 4,75 mm, num total de 42 peças.

As quantidades de amostras, tipo de revestimento e processo de aspersão são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Quantidade de amostras por tipo de revestimento e processo de aspersão

Material	Processo	Quantidade de Amostras	Código
Al	FS	7	Al FS 1
		7	Al FS 2
	AS	7	Al AS 1
		7	Al AS 2
Zn	FS	7	Zn FS 1
		7	Zn FS 2

Onde, os códigos são descritos da seguinte maneira: MATERIAL DE REVESTIMENTO_PROCESSO DE ASPERSÃO_CONFIGURAÇÃO. A

CONFIGURAÇÃO é referente aos parâmetros utilizados para o procedimento, onde 1 refere-se a primeira pressão de ar comprimido utilizada, e 2 à segunda.

O procedimento foi realizado na empresa Revesteel (instalada na R. Aluísio de Azevedo, 414 - Vargem Grande, Pinhais – PR), que disponibilizou a matéria prima para revestimento, mão de obra e equipamentos para a realização do procedimento de aspersão das amostras.

Primeiramente, os corpos de prova foram submetidos ao processo de preparação do substrato, através jateamento abrasivo das amostras com partículas de óxido de alumínio 16 (Al_2O_3). O procedimento foi realizado a uma distância de 150 mm das amostras, com uma pressão de 4,83 bar, obtendo um grau de limpeza SA3 (de acordo com a norma sueca SIS-05 5900/1967) ou jateamento ao metal branco, onde ocorre toda remoção de óxidos e carepas da amostra, procedimento realizado em gabinete de jateamento pressurizado CMV, visando a limpeza de eventuais óxidos e adequação da rugosidade na superfície a ser revestida, para facilitar a ancoragem das partículas fundidas à superfície, que ao se deformarem sobre o substrato se denominam “panquecas”. A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados na preparação dos corpos de prova. O procedimento de aspersão foi, impreterivelmente, realizado logo em seguida da preparação das amostras para evitar efeitos oriundos da re-oxidação da superfície previamente preparada.

Tabela 3: Parâmetros utilizados no processo de jateamento abrasivo

Jateamento	Parâmetros
Partícula	Oxido de Al 16 (Al_2O_3)
Altura	150 mm
Pressão	4,83 bar
Máquina	Gabinete de jateamento CMV
Grau de limpeza	SA3

A Figura 11, na sequência, mostra o gabinete de jateamento onde as amostras foram inseridas e o procedimento de preparação das amostras foi realizado.



**Figura 11 - Operador realizando a preparação das amostras por meio do processo de jateamento.
Fonte: Autoria própria (2018).**

Um dispositivo de fixação acoplável, Figura 12, foi desenvolvido a fim de fixar os corpos de prova, este dispositivo, com capacidade de fixação de 7 amostras, permitiu a aspersão dessas, simultaneamente. O procedimento de deposição do revestimento foi realizado manualmente por um operador previamente treinado, que realizou movimentos lineares com a pistola, como pode ser visto na Figura 13, buscando maior reprodutibilidade e produção de corpos de prova comparáveis entre si, buscando revestimentos homogêneos. Os parâmetros para as aspersões foram determinados de acordo com procedimentos da empresa parceira.



Figura 12 - Dispositivo de fixação para aspersão das amostras.
Fonte: Autoria própria (2018).



Figura 13 - Sentido de aplicação do revestimento para o processo de aspersão térmica à chama convencional.
Fonte: Autoria própria (2018).

Após o procedimento de preparação, 14 corpos de prova foram submetidos ao procedimento de aspersão térmica a chama convencional (FS) com aplicação de

alumínio (Al) como revestimento, utilizando uma pistola de aplicação Sulzer Metco 16E Series Combustion Wire Spray Guns, representada na Figura 12, e fonte de alimentação Sistema de Combustão Manual também da Metco. Neste procedimento foram produzidos 7 corpos de prova com os parâmetros iniciais e 7 corpos de prova produzidos com a variação do parâmetro de processo ar comprimido. A Tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados para a produção das 14 amostras, a deposição de revestimento foi realizada em 8 passes, a uma distância entre a pistola e os corpos de prova de aproximadamente 180 mm, de acordo com procedimento operacional da empresa parceira.



Figura 14 - Pistola de aplicação Metco para aspersão à chama convencional. Fonte: Autoria própria (2018).

Tabela 4: Parâmetros utilizados para a aspersão de alumínio no processo à chama convencional.

Processo de chama Convencional - Aspersão de alumínio			
Al_FS_1		Al_FS_2	
Acetileno	1,1 bar	Acetileno	1,1 bar
Oxigênio	4,0 bar	Oxigênio	4,0 bar
Ar comprimido	6,9 bar	Ar comprimido	4,9 bar
Vazão ace.	38%	Vazão ace.	38%
Vazão oxi.	40%	Vazão oxi.	40%

Posteriormente, outros 14 corpos de prova foram expostos ao processo de aspersão térmica a arco elétrico (AS), com aplicação de alumínio (Al) como revestimento, utilizando uma pistola de aplicação LD/U3 Electric Arc Wire Spray Gun da Sulzer Metco, representada na Figura 15, e fonte de energia, do mesmo

fabricante da pistola, EcoArc 350A. Neste procedimento foram produzidos 7 corpos de prova com os parâmetros iniciais e 7 corpos de prova produzidos com a variação do parâmetro de processo ar comprimido. A Tabela 5 apresenta os parâmetros utilizados para a produção das 14 amostras, a deposição de revestimento foi realizada em 8 passes a uma distância entre a pistola e os corpos de prova de aproximadamente 180 mm.



Figura 15 - Pistola de aplicação Metco para aspersão à arco elétrico.

Fonte: Aatoria própria (2018).

Tabela 5: Parâmetros utilizados para a aspersão de alumínio no processo ao arco elétrico.

Arco elétrico - Aspersão de alumínio			
Al_AS_1		Al_AS_2	
Corrente	300 A	Corrente	300 A
Ar comprimido	6 bar	Ar comprimido	4 bar

Por fim, outros 14 corpos de prova foram submetidos ao processo de aspersão térmica a chama convencional (FS), com aplicação de zinco (Zn) como revestimento, o sistema de aplicação permaneceu o mesmo da aspersão de alumínio a chama convencional. Neste procedimento foram produzidos 7 corpos de prova com os parâmetros iniciais e 7 corpos de prova produzidos com a variação do parâmetro de processo ar comprimido. A Tabela 6 apresenta os parâmetros utilizados para a produção das 14 amostras, a deposição de revestimento foi realizada em 8 passes a uma distância entre a pistola e os corpos de prova de aproximadamente 180 mm.

Tabela 6: Parâmetros utilizados para a aspersão de alumínio no processo a chama convencional.

Chama convencional - Aspersão de zinco			
	Zn_FS_1		Zn_FS_2
Acetileno	1,1 bar	Acetileno	1,1 bar
Oxigênio	4,0 bar	Oxigênio	4,0 bar
Ar comprimido	6,9 bar	Ar comprimido	4,9 bar
Vazão ace.	40%	Vazão ace.	40%
Vazão oxi.	40%	Vazão oxi.	40%

Após o procedimento de aspersão térmica, os corpos de prova foram resfriados em temperatura ambiente e cuidadosamente embalados em papel kraft, afim de evitar o contato entre as amostras e possíveis danificações no revestimento.

Importante frisar que, o processo à arco elétrico não foi realizado com zinco, porque o fornecedor não disponibilizava deste material de adição para esse processo.

3.3 PREPARAÇÃO METALOGRAFICA

Após a aspersão térmica, as amostras foram preparadas para análises metalográficas, visualmente foram escolhidas as amostras, uma por configuração de aspersão, para os ensaios seguintes. A sequência de preparação, visando análise por microscopia ótica (MO) englobou, basicamente, as seguintes etapas:

- a) Corte transversal com disco abrasivo em máquina policorte (Arotec – Arocor 60), sempre no sentido do revestimento para o substrato, para evitar possível destacamento na interface revestimento/substrato;
- b) Embutimento a quente da amostra retirada em embutidora automática (Struers – Predopress);
- c) Lixamento manual em lixadeira metalográfica dupla (Struers) – lixas 220, 300, 400, 600 e 1200;
- d) Polimento manual das amostras em politriz automática (Struers – Dap V) – polimento com alumina 1 μm ;
- e) Secagem e acondicionamento das amostras, protegendo a superfície de interesse com algodão, evitando contato com umidade.

3.4 CARACTERIZAÇÃO MICRO E MACRO ESTRUTURAL

3.4.1 Microscopia Ótica

Foi utilizado um microscópio Olympus BX51M, com uma lente MPlan N de aumento 100x, para a análise de todas as amostras. As fotos foram tiradas com a câmera, acoplada ao microscópio, CoolSNAP-Pro cf Color – Media Cybernetics, o que possibilitou registrar a interface revestimento/substrato para análises de porosidade e espessura.

3.4.1.1 Medição da espessura do revestimento

A medição da espessura dos revestimentos foi realizada por microscopia ótica, com análise visual direta da seção transversal das amostras, como na Figura 16.

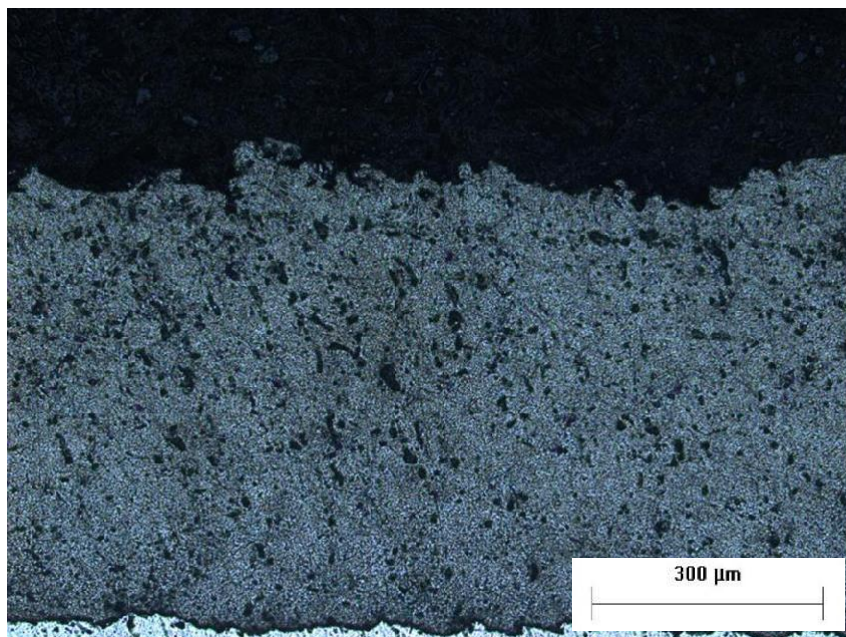


Figura 16 - Vista transversal do corpo de prova Al_FS_1. Lente com aumento de 100x.

Fonte: Autoria própria (2018)

Então, com o uso do software Image-Pro Plus, foi traçado uma curva, contornando toda a área do revestimento, na sequência, traçado uma linha, como ilustrado na Figura 17, pelo comprimento da área delimitada, para efetuar a operação representada pela equação 1.

$$espessura = \frac{área}{comprimento} \quad (1)$$

Obtendo uma espessura média por toda a área analisada. As medições foram aferidas em 3 regiões do corte transversal, nas extremidades e no centro, para melhorar a aproximação da espessura média.

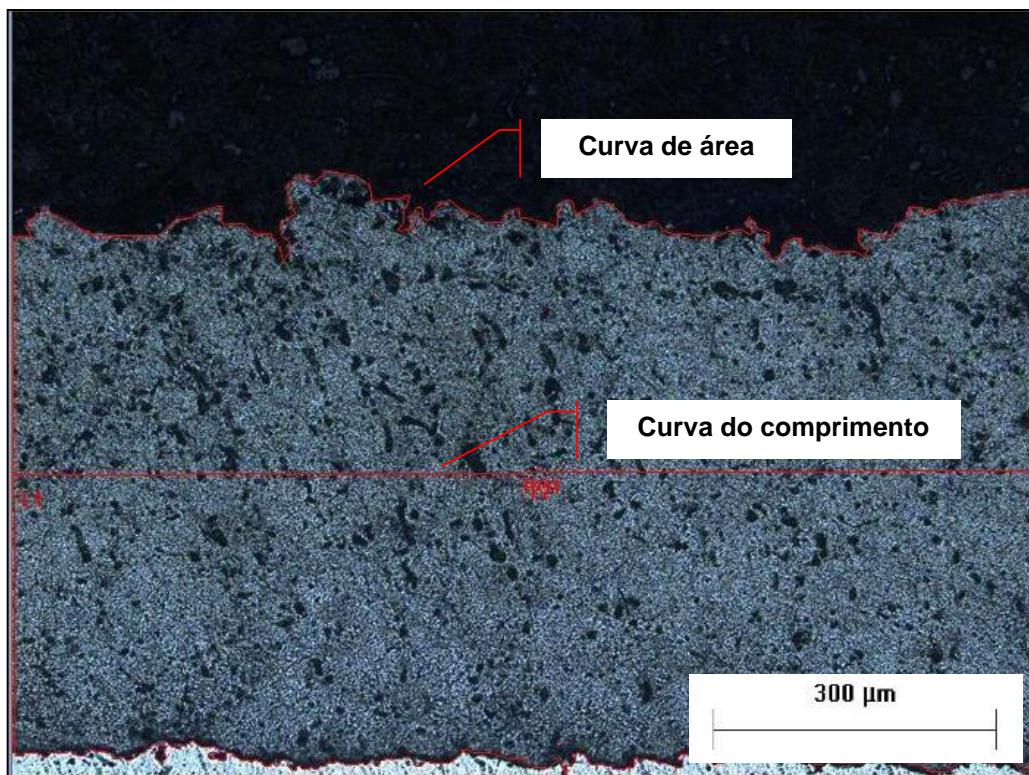


Figura 17 - Corte transversal da amostra Al_FS_1. Curvas de área e comprimento para cálculo da espessura média.

Fonte: Autoria própria (2018).

3.4.1.2 Medição da porosidade mais óxidos

A medição da porosidade mais óxidos também foi estimada com auxílio do programa Image-Pro Plus, a partir das mesmas regiões selecionadas para cálculo da espessura, extremidades e centro, de cada amostra, a estimativa foi calculada da seguinte forma:

Uma área de interesse é delimitada na amostra, evitando a superfície do revestimento e a interface com o substrato, para não ter interferência de impurezas ou descontinuidades no cálculo, como na Figura 18.

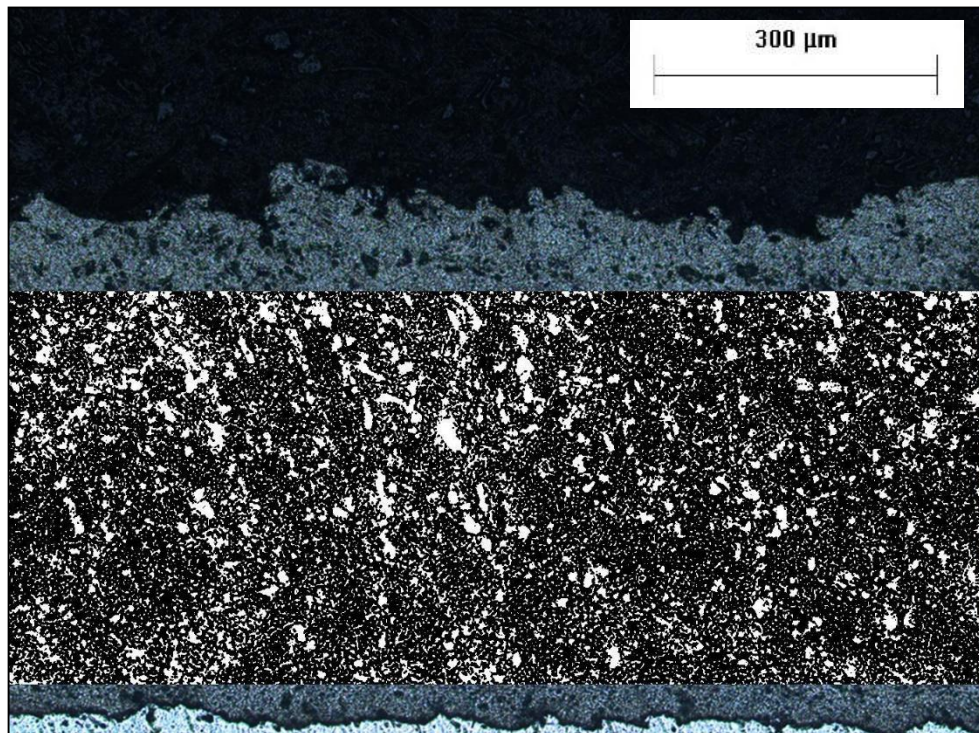


Figura 18 - Área de interesse delimitada na amostra Al_FS_1 para cálculo da porosidade mais óxidos da amostra, com filtro branco/preto. Fonte: Autoria própria (2018).

Como pôde ser visto na Figura 18 **Error! Reference source not found.**, um filtro para contraste dos poros e óxidos com o material base foi aplicado, com isso, o software calcula, em termos de percentual de área, o tamanho de cada porção, poros e óxidos em branco e material de revestimento em preto.

3.4.2 Medição da rugosidade

A rugosidade superficial dos revestimentos foi analisada em um rugosímetro digital de bancada marca Mahr, modelo MarSurf PS1, de acordo com a Norma DIN 4768. Foram considerados para a caracterização das amostras o parâmetro de rugosidade R_a , que consiste na média aritmética das distâncias dos picos, calculados através de uma linha média, conforme ilustrado na Figura 19.

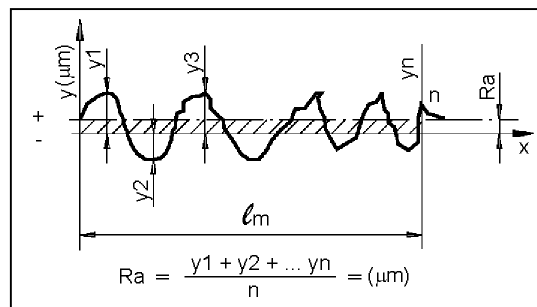


Figura 19 - Desenho esquemático da medição e cálculo do parâmetro R_a

Os valores médios do parâmetro de rugosidade (R_a), expressos em μm , foram calculados a partir da medição efetuada sobre cinco regiões distintas e equidistantes do revestimento do corpo de prova. A Figura 20 mostra o equipamento utilizado para a medição dos corpos de prova.

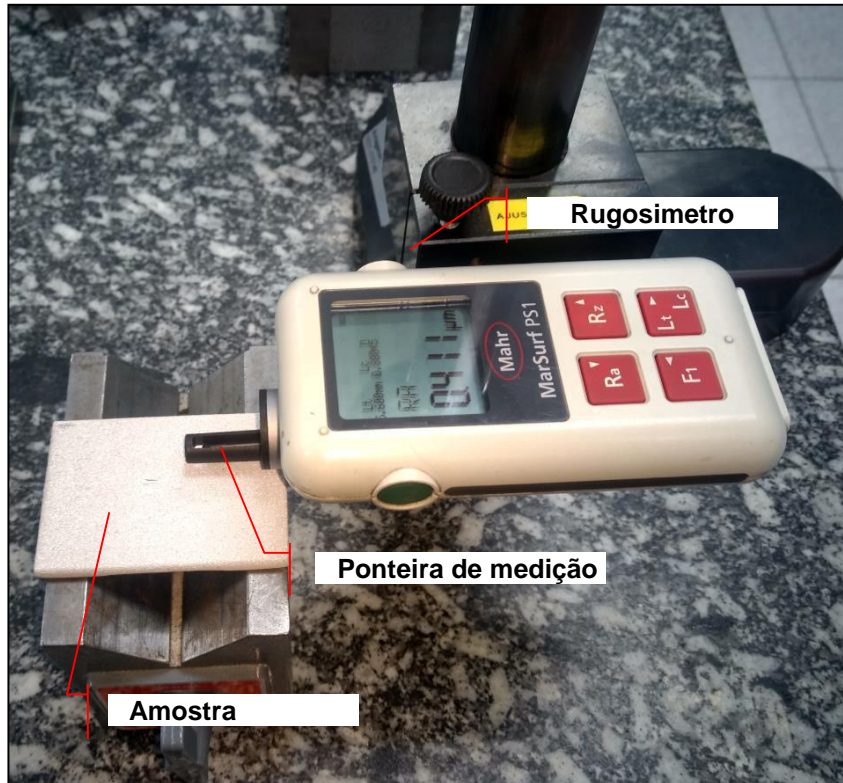


Figura 20 - Equipamento utilizado para a medição de rugosidade.
Fonte: Autoria própria (2018).

3.5 CARACTERIZAÇÃO DA PROPRIEDADE MECÂNICA – DUREZA

Determinou-se a dureza dos revestimentos por intermédio de ensaios de dureza Vickers (HV1). O equipamento usado foi um durômetro Instron Wolpert, sendo as medições feitas diretamente sobre a seção transversal das amostras metalográficas. Essa técnica emprega um indentador piramidal de diamante, o qual é impelido por uma carga padronizada e penetra na superfície polida da amostra, produzindo uma pequena deformação plástica na forma de um losango (indentação). Para cada amostra, cinco pontos foram ensaiados ao longo de uma linha equidistante da superfície do revestimento e da interface deste com o substrato, conforme o esquema apresentado na Figura 21. A partir dos valores medidos para as duas diagonais da indentação, uma rotina computacional efetuou o cálculo da dureza para cada um dos cinco pontos e gerou um valor médio.

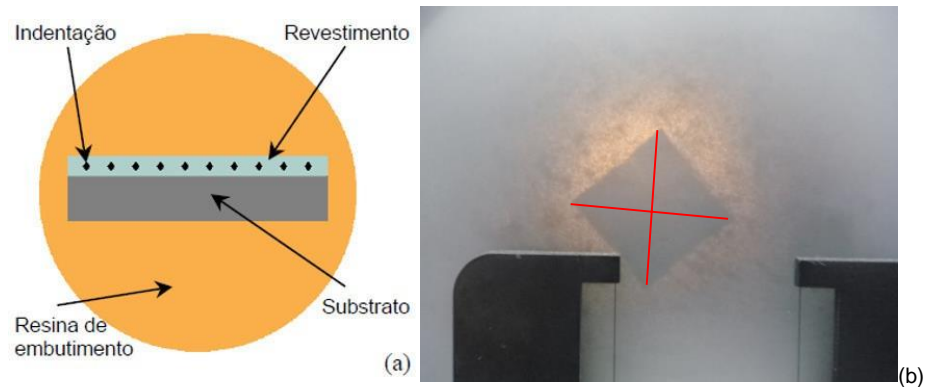


Figura 21 - (a) Esquema representativo do posicionamento das indentações para medição da dureza. (b) Representação do posicionamento das linhas diagonais para medição da indentação.

Fonte: Adaptado de Schiefler (2004).

O programa para cálculo da dureza HV1 foi criado no durômetro de acordo com os valores de set up informados no manual. A carga aplicada foi de 9,807 N por um tempo t de 10 segundos. A Figura 22 mostra a amostra no momento da medição da dureza e o durômetro utilizado.



Figura 22 - Durômetro utilizado para medições de Dureza HV1.

Fonte: Autoria própria (2018).

3.6 CARACTERIZAÇÃO ELETROQUÍMICA

Para a caracterização eletroquímica foram considerados dois ensaios, são eles:

- OCP – monitoramento do potencial de corrosão;
- PPA – ensaio de polarização.

Com o objetivo de verificar qual das configurações de aspersão propostas são mais eficazes frente à corrosão em ambiente marinho.

Foram preparadas 4 amostras de cada configuração de aspersão, apenas cortando o corpo de prova aspergido, com auxílio de uma máquina policorte (Arotec – Arocor 60), ao meio. A definição dessa quantidade a ser preparada deu-se caso houvesse algum contratempo durante os ensaios e o esse precisasse ser refeito. Porém, efetivamente foi usado apenas uma amostra de cada corpo de prova.

3.6.1 Monitoramento do potencial de corrosão (OCP)

Primeiramente, foi preparado o eletrólito da célula de ensaio, ou seja, o meio condutivo, simulando água do mar. Para isso, concebeu-se uma solução de água destilada com 3% de NaCl, em massa.

Em paralelo, as amostras foram dispostas seguindo o procedimento abaixo:

- Limpeza da superfície revestida e da superfície sem revestimento, com água e sabão;
- Mergulhadas em etanol durante 2 – 3 minutos;
- Secagem com ar quente.

Então, fixou-se o corpo de prova ao dispositivo de ensaio e feito as devidas adaptações, como ilustrado na imagem abaixo **Figura 23**:



Figura 23 – Posição de fixação do corpo de prova do dispositivo de ensaio OCP.
Fonte: Autoria própria (2018).

Logo após essa fixação, a água simulada foi vazada dentro do dispositivo, e então, para finalizar a montagem da célula, introduziu-se o eletrodo de referência e o contra eletrodo, tendo a amostra como eletrodo de trabalho, isso pode ser visto na **Figura 24** abaixo.

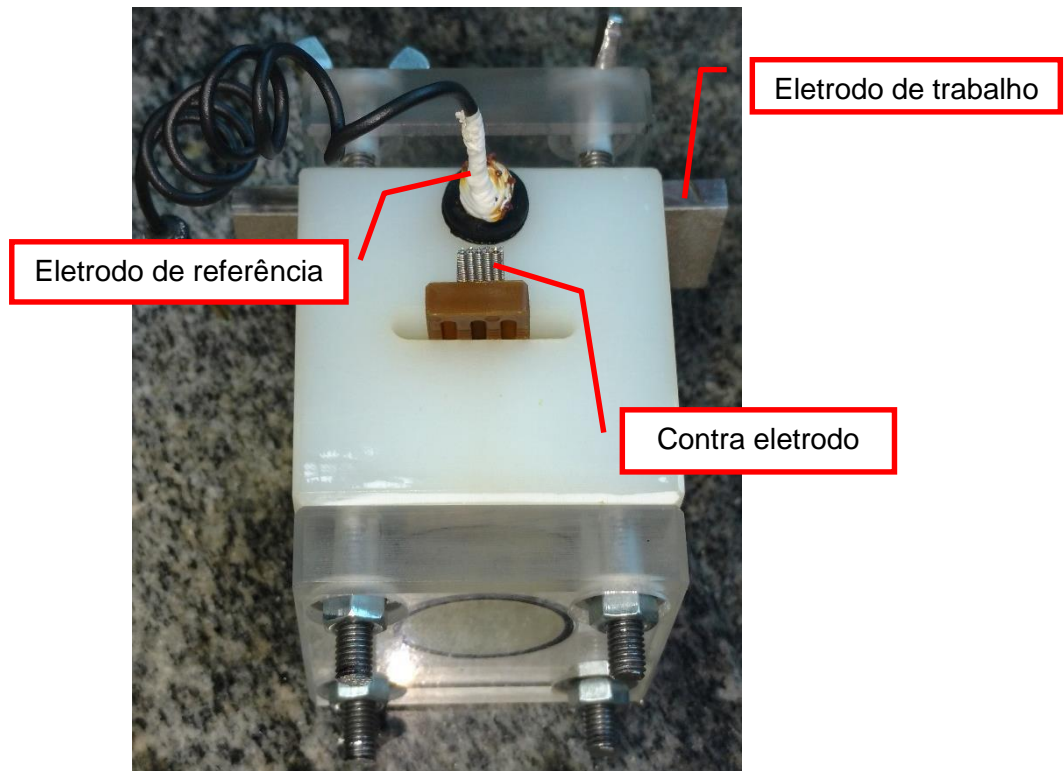


Figura 24 – Componentes da célula de testes OCP e PPA.
Fonte: Autoria própria (2018).

Essa mesma configuração foi usada para o ensaio PPA, porém, o potenciostato – Potenciostato EG&G modelo 273A – operou em funções diferentes para os dois testes, como mostrado na Figura 25 abaixo.

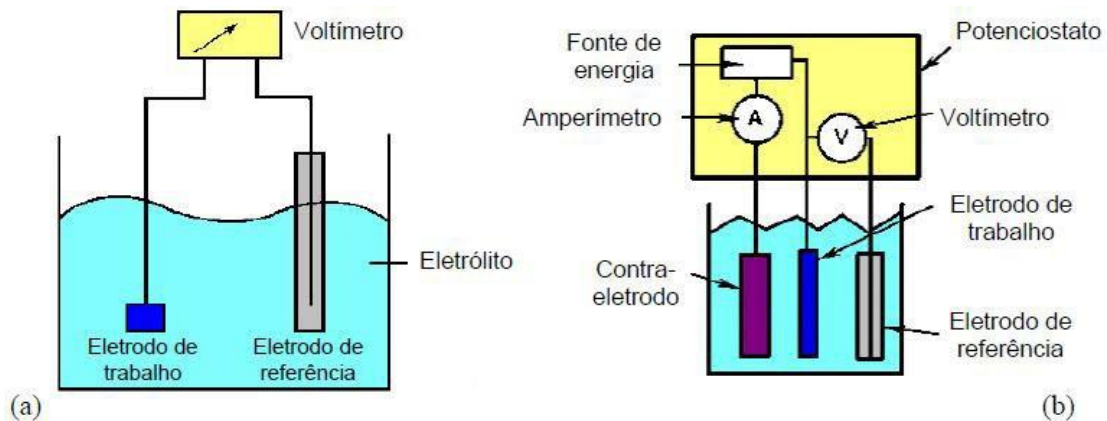


Figura 25: Esquema de montagem da célula de ensaio. (a) Função para monitoração do potencial de corrosão. (b) Função para monitoração da curva de polarização. Fonte: Adaptado de EG&G Princeton, 1987 e TAIT, W. S. (1994).

Portanto, para o ensaio OCP o equipamento considerou apenas o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência para as medições. Para este e para o ensaio PPA o eletrodo de referência foi um eletrodo de Prata/Cloreto de Prata (Ag/AgCl). Este ensaio foi programado para rodar durante 7200 segundos, registrando um ponto a cada 36 segundos. Ainda como dado de entrada para o programa, a área analisada da amostra foi de 3,14 cm². Experimentos realizados à temperatura ambiente.

Por fim, os dados coletados foram tratados com auxílio do software SciDavis, para gerar as curvas de tensão vs tempo (E_{corr} [V] x Tempo [s]).

3.6.2 Monitoramento da polarização (PPA)

Com o mesmo dispositivo usado para o ensaio OCP deu-se início ao ensaio PPA, porém com a função (b) da figura 23 em operação, a figura abaixo (**Figura 26**) apresenta como os eletrodos foram conectados.

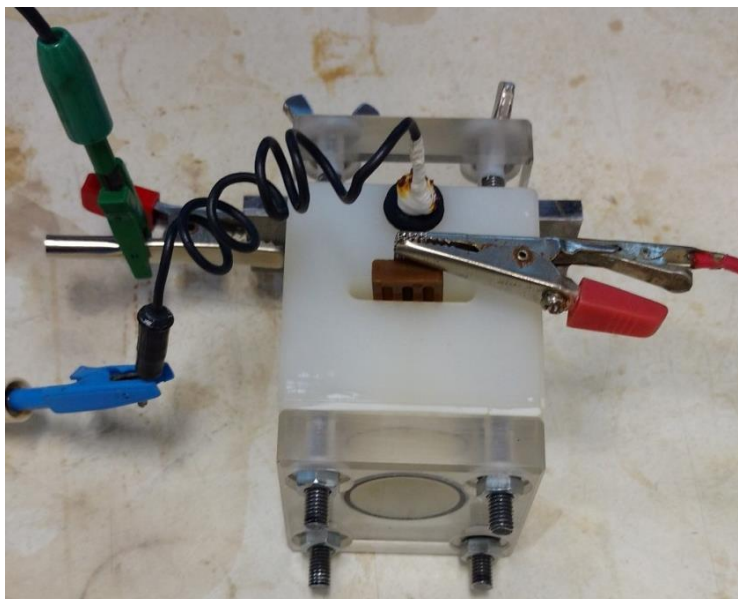


Figura 26 - Cabos do potenciostato conectados aos componentes da célula de ensaio.
Fonte: A autoria própria (2018).

Adicionalmente ao ensaio anterior, o sistema considerou o contra eletrodo para as medições, este sendo uma rede de paládio com elevada área, mostrado em detalhe abaixo na **Figura 27**.

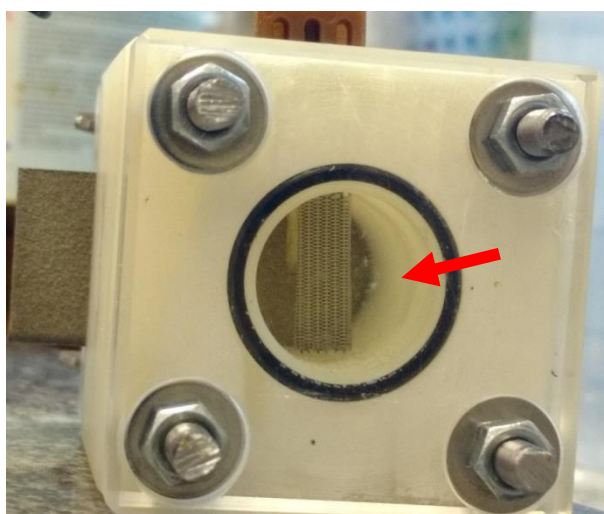


Figura 27 - Detalhe da rede de paladio utilizada como contra eletrodo.
Fonte: A autoria própria (2018).

As curvas PPA foram iniciadas em um potencial 100mV abaixo do potencial de corrosão, com uma variação de 0,1mV/s até $E_{corr} = 1,8V$. Experimento, também, realizado à temperatura ambiente.

Da mesma forma anterior, os dados foram tratados com o software SciDavis, obtendo as curvas de tensão x corrente/área, sendo o eixo das abscissas em base logarítima ($E_{corr} [V] \times \text{Log } J [A/cm^2]$).

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E PROPRIEDADES DO REVESTIMENTO

A **Tabela 17** compara os dados obtidos por meio da caracterização micro estrutural e as propriedades mecânicas apresentadas pelos diferentes revestimentos e processos de aspersão térmica. Importante ressaltar que, foi analisada apenas 1 amostra de cada configuração de aspersão, o que inviabiliza um tratamento estatístico dos resultados. Porém, como forma de compensar o erro amostral, os ensaios foram conduzidos à taxas muito baixas, como apresentado nos procedimentos, isso traz maior precisão aos resultados.

Tabela 7: Resultados da caracterização microestrutural e propriedades mecânicas determinadas para os diversos revestimentos.

Revestimento	Al_FS_1	Al_FS_2	Al_AS_1	Al_AS_2	Zn_FS_1	Zn_FS_2
Espessura (μm)	661,39	505,43	669,28	362,09	356,01	448,60
Poros mais oxidos (% Area.)	22,72	12,22	27,14	26,25	13,22	17,04
Rugosidade Ra (μm)	13,21	13,86	15,71	15,65	8,02	8,87
Dureza (HV1)	36,90	29,98	42,48	35,10	20,34	22,64

Observa-se na tabela 7 que os valores de espessura do revestimento de alumínio aspergidos no processo de Chama Convencional e Arco Elétrico é sempre maior para a configuração 1 quando comparado à configuração 2. Esta diferença é encontrada devido a mudança no parâmetro ar comprimido, que é responsável pela alteração na velocidade de aspersão do material. Portanto, quanto maior a pressão de ar comprimido, maior será a espessura da camada final de revestimento, mantendo-se o tempo de aplicação e a quantidade de passes constantes. Round (1989), no capítulo 2.2.3, explana que, a velocidade relativa pistola-peça influencia na espessura do revestimento, neste experimento, variando-se a velocidade de propagação das partículas, e mantendo os outros parâmetros constantes. Também verificou-se uma dependência desse fator quanto a espessura de revestimento, que aumenta de forma direta.

A mesma lógica é aplicada ao processo de aspersão térmica à chama convencional com zinco, porém como verificado na tabela os valores não

correspondem a esta lógica, esta diferença (inversão) da espessura, se deu devido a uma inconsistência técnica durante o processo de aspersão, onde não foi possível garantir o mesmo número de passes durante o procedimento, neste caso, a configuração 2 teve um número de passes maior que a configuração 1. Para esse caso, a comparação não é relevante.

Não foi possível observar uma variação considerável no teor poros+óxidos, possivelmente pelo número reduzido de amostras analisadas. Mas, é possível relacionar a redução no teor de acetileno, no caso da aspersão por chama convencional com Al, cuja temperatura de chama é reduzida, por conta desse teor menor (38% ao invés de 40%, utilizado na aspersão por chama convencional com Zn). E, como explanado por Somolev (1994), maior a temperatura das partículas, menor o teor de poros. Ou seja, como a redução no teor de acetileno reduz a temperatura de chama, a temperatura das partículas também é reduzida, configurando um teor de poros maior. Essa taxa de acetileno teve de ser modificada para estabilização do processo.

Referente a rugosidade, esperava-se que o processo à arco elétrico proporcionasse amostras com maior rugosidade devido a maior temperatura o que proporciona partículas mais irregulares, quando comparado ao processo chama convencional. Com os dados obtidos nas medições de rugosidade, é possível confirmar essa teoria.

A dureza seguiu a literatura, segundo Zhao et al (2004), a energia térmica e cinética influi diretamente na dureza do revestimento, quanto maior essas energias, maior a dureza apresentada. Desta maneira, as configurações de aspersão com velocidade das partículas mais elevada, apresentaram dureza de revestimento maiores.

4.2 CARACTERIZAÇÃO ELETROQUÍMICA

Primeiramente, foram realizados os ensaios de OCP, para se obterem os potenciais de corrosão para então iniciar os ensaios PPA.

Os potenciais de corrosão, obtidos após 2 horas de ensaio, podem ser vistos na Tabela 8 abaixo.

Tabela 8: Potenciais de corrosão obtidos pelo ensaio OCP.

Amostra	Ecorr (V)
Al_FS_1	-0,535
Al_FS_2	-0,675
Al_AS_1	-0,735
Al_AS_2	-0,512
Zn_FS_1	-0,669
Zn_FS_2	-0,877

As curvas dos revestimentos em Zn estabilizaram mais rapidamente que os revestimentos em Al, pelo Al possuir maior atividade eletroquímica na interface revestimento/eletrólito. Adicionalmente, as curvas completas podem ser vistas nos Apêndices A, B, C, D, E, F e G.

Como pode ser visto na curva do Apêndice N, onde estão as curvas PPA de todas as amostras, é possível diferenciar as amostras revestidas com Al e Zn, pois, o zinco tende à passivação, já o Al, possui um Ecorr mais elevado, se comparado às mesmas condições de aspensão (Al_FS_1/2 e Zn_FS_1/2). As curvas completas estão disponíveis nos apêndices H, I, J, K, L, M e N.

Ambas as amostras revestidas com Zn iniciam a passivação por volta de - 0,39V. Na amostra Zn_FS_2, porém, a perda de passividade acontece por volta de 0,95V, sendo que na amostra Zn_FS_1, a região passiva persiste até o fim do ensaio, nesta comparação, mostrando-se um revestimento mais eficiente contra corrosão.

Os produtos de corrosão ficaram evidentes nos corpos de prova, por uma camada branca sobre as regiões ensaiadas, como pode ser visto nas Figura 28 e Figura 29 a seguir.

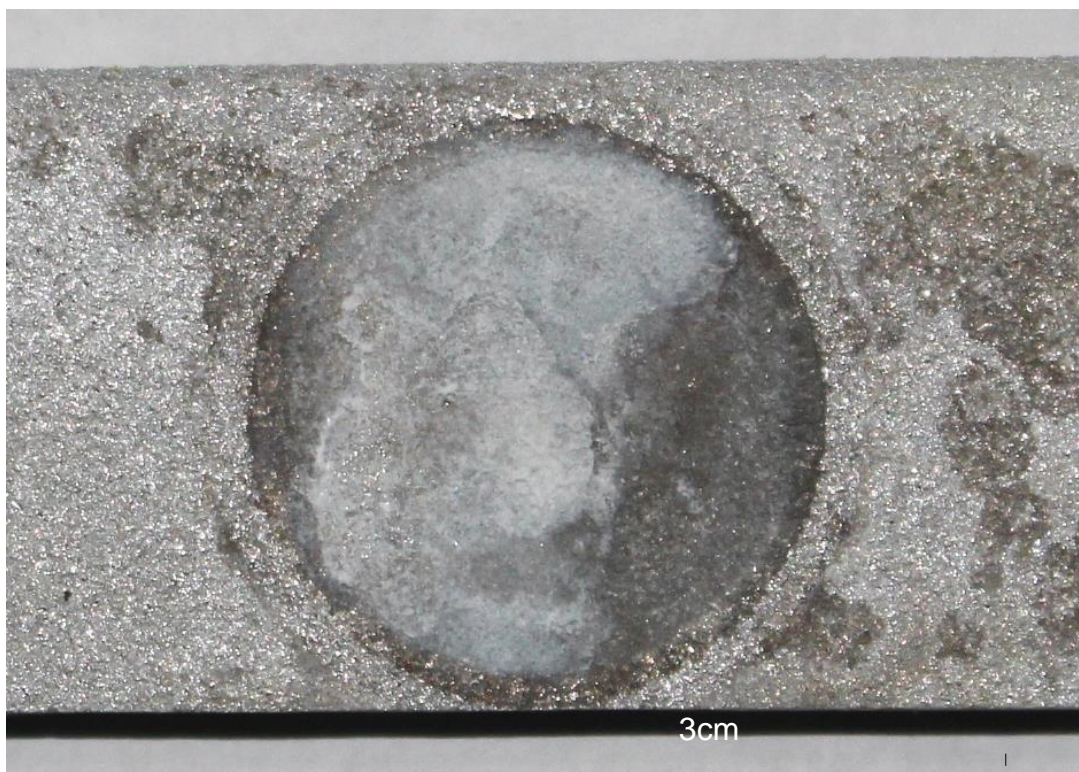


Figura 28 – Detalhe da área ensaiada pelo método PPA, amostra AI_FS_2. Produtos de oxidação formam uma mancha branca sobre a área.
Fonte: Autoria própria (2018).

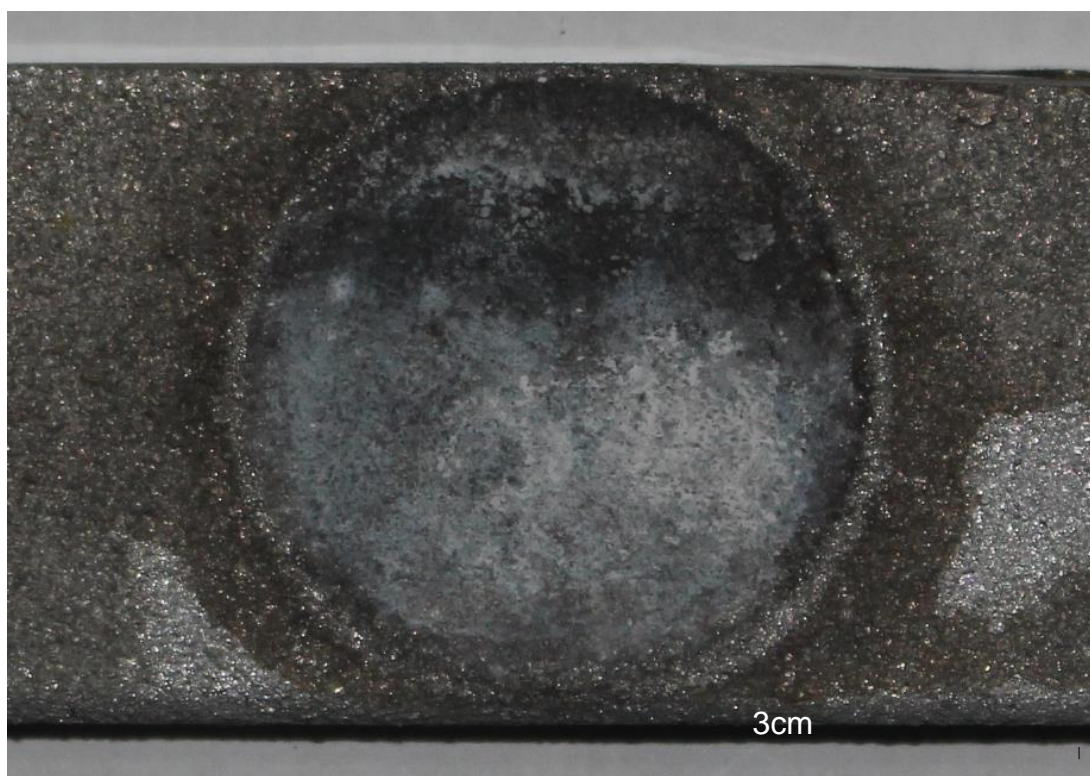


Figura 29 - Detalhe da área ensaiada pelo método PPA, amostra AI_AS_2. Produtos de oxidação formam uma mancha branca sobre a área.
Fonte: Autoria própria (2018).

Na sequência (**Figura 30**) são apresentados todos os corpos de prova, após ensaios eletroquímicos.

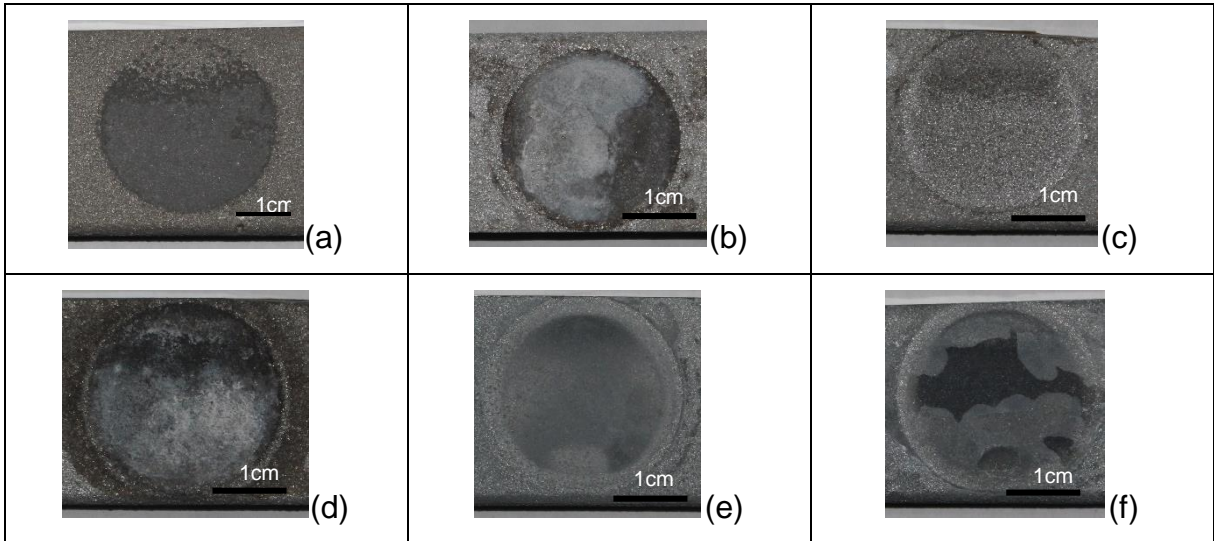


Figura 30 – Áreas ensaiadas por OCP e PPA. (a) Al_FS_1 (b) Al_FS_2 (c) Al_AS_1 (d) Al_AS_2 (e) Zn_FS_1 (f) Zn_FS_2

Fonte: Autoria própria (2018).

Nos casos (a), (c) e (e), o revestimento ofereceu maior proteção ao substrato, comprovando eficiência superior para os revestimentos com maior espessura. Sendo, ainda, o caso (e) o melhor, seguindo a resposta da curva respectiva, onde a região de passivação perdurou até o fim do ensaio, como descrito nos parágrafos anteriores.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para as análises eletroquímicas foi utilizado um dos laboratórios do Departamento Acadêmico de Química e Biologia da UTFPR, onde todos os recursos foram disponibilizados, porém necessitou-se de uma adaptação na célula eletroquímica, para que as amostras de interesse pudessem ser fixadas no dispositivo, mas sem grandes dificuldades. Para compensar o curto espaço de tempo disponível para testar todas as amostras, as taxas de incremento de tensão, em todos os testes, foram baixas, para favorecer um resultado mais confiável.

A espessura dos revestimentos variou diretamente com a velocidade de asperção das partículas. Quanto mais aceleradas, maior a espessura do revestimento, porque, tendo os demais parâmetros mantidos, um número maior de partículas se conforma sobre o substrato.

Não foi possível obter uma relação concreta sobre a porosidade, por conta do número singular de amostras por configuração de parâmetros, não sendo possível obter dados para uma análise estatística confiável. Contudo, uma afirmação pode ser feita, nos casos em que o teor de acetileno foi reduzido, favorecendo uma temperatura de chama menor, por consequência, partículas fundidas com menor temperatura, foi apresentado um valor maior de porosidade, seguindo as afirmações de Somolev (1994).

A rugosidade variou nos processos que favorecem temperatura de partículas maiores, aumentando com o aumento de temperatura, por conta das partículas irregulares derivadas desse parâmetro.

Como resposta ao questionamento proposto no objetivo da pesquisa, o melhor material de revestimento, e processo de aspersão, dentre as variações estudadas, é o zinco aspergido por chama convencional (FS), na configuração de maior velocidade de propagação das partículas, uma vez que possui a maior região de passivação dentre as curvas analisadas. Ou seja, fornece maior proteção ao substrato dentre as amostras estudadas, referente à passivação.

Foi evidenciado uma dureza mais elevada, quando o processo forneceu energia cinética maior para as partículas, seguindo estudos de Zhao et al (2004).

Por outro lado, em termos de potencial de corrosão, a amostra aspergida por arco elétrico com Zn, com a velocidade de aspersão das partículas reduzida,

apresentou resultado mais elevado, sendo a mais eficiente frente à corrosão, neste caso.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

Durante os experimentos foram identificados alguns pontos onde outras análises podem agregar na qualidade dos resultados, como:

- Realizar os experimentos com corpos de prova em diferentes configurações de aspersão térmica;
 - Realizar os ensaios eletroquímicos em um número maior de corpos de prova;
 - Realizar os ensaios eletroquímicos durante um intervalo maior de tempo;
- Realizar os ensaios eletroquímicos com um eletrólito diferente da água do mar simulada.

REFERÊNCIAS

ASM, I. (2000). **Corrosion: Understanding the Basics**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14643: CORROSÃO ATMOSFÉRICA - CLASSIFICAÇÃO DA CORROSIVIDADE DE ATMOSFERAS**. Rio de Janeiro, 2001. 12 p.

BRANDOLT, M. S. C. S. **Rijeza Metalurgia**. Disponível em: <<http://www.rijeza.com.br/>>. Acesso em: 07 jun. 2017.

CALLISTER JR., W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 3rd Edition, John Wiley & Sons, 1994, 811p.

CARNEIRO, Rogério Augusto, ALVARENGA, Evandro de Azevedo. **Novos Aços Estruturais de Elevada Resistência à Corrosão Marinha**. CONSTRUMENTAL – Congresso Latino-Americano da Construção Metálica, São Paulo, 2010.

CLARE, J. H., CRAWMER, D. E. **Thermal Spray Coatings**. In: American Society for Metals. Surface cleaning, finishing, and coating. Ohio, V. 5, 1982, pp. 361-374.

DIN 4768 – Comparison of Surface Roughness Values.

EG&G Princeton Applied Research – Electrochemical Instruments Division. **Application Note Corr-4: Electrochemistry and Corrosion Overview and Techniques**. Princeton, NJ, 1987, 16p.

FONTANA, M. G. **Corrosion Engineering**, 3rd Edition, McGraw-Hill, NY, EUA, 1986.

FORSÉN, O., AROMAA, J., KUKKONEN, J-J., TAVI, M. **The Electrochemical Behavior of Steel Coated with Plasma Sprayed Coatings**. Materials Science Forum, Vols. 111-112, 1992, pp. 245-256.

GEMELLI, E. **Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2001, 183p.

GENTIL, V. (1996). **Corrosão** (3^o Edição ed.). Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

HEARLEY, J.A., LITTLE, J.A., SURGEON, A.J. **The effect of spray parameters on the properties of high velocity oxi-fuel NiAl intermetallic coating**. Surface and Coating Technology. V. 123. 2000.

HEINRICH, P. **Thermal Spraying - Facts and State-of-the-Art** (Sonderdruck). Hoellriegelskreuth, v. 10, Out. 1992, pp. 3-28.

HOWES, JR., C. P. **Thermal Spraying: Processes, Preparation, Coatings and Applications**. Welding Journal, AWS, V. 73, No. 4, 1994, pp. 47-51.

JONES, D. A. **Principles and Prevention of Corrosion**. Prentice-Hall, Inc., NJ, USA, 2nd Edition, 1996, 572p.

KHANNA, A. S. **New Generation Coatings – A Combination of Thermal Spray and Organic Paint Coatings to Give Enhanced Corrosion Protection in Aggressive Environments**. Corrosion Science & Engineering, Indian Institute of Technology, Bombay, 1998.

KOZLIK Jr., Antonio, **Sistemática para Análise de Falha por Corrosão em Componentes Mecânicos Metálicos**, 2007, 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

KREYE, H. **Lichtbogenspritzschichten auf Al- und Cu-Basis mit Hartstoffeinlagerungen**. Technischer Bericht, Institut für Werkstofftechnik der Universität der Bundeswehr Hamburg, 1999.

LAFRAIA, J. R. (2001). **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, Petrobrás.

LIMA, C. C. & TREVISAN, R. **Aspersão Térmica – Fundamentos e Aplicações**. Editora Artlieber Ltda., São Paulo, SP, 2002.

MARANHO, Ossimar. **Aspersão térmica de ferro fundido branco multicomponente**. 188 p. Tese (doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, 2006.

McCUNE, R.C., PAPYRIN, A.N., HALL, J.N., RIGGS II, W.L., ZAJCHOWSKI, P.H. **An Exploration of the Cold Gas-Dynamic Spray Method for Several Materials Systems**. Proceedings of the 8th National Thermal Spray Conference, Houston, Texas, USA, 1995.

MUSIL, J. **Thermal Spray Technologies – An Integral Part of Modern Production Processes**. Journal of Thermal Spray Technology, ASM International, V. 6, No. 4, 1997, p. 387.

PANNONI, Fabio Domingos, PhD. **FUNDAMENTOS DA CORROSÃO**. Disponível em: <http://colegiometa.yolasite.com/resources/Fundamentos_da_corros%C3%A3o.pdf> Acesso em 25 de março de 2018.

PANOSSIAN, Zehbour. **Corrosão e Proteção contra corrosão em Equipamentos e Estruturas Metálicas**. Graphium Publicidade e Editora, São Paulo: 1993.

PAPST, N. A. **Aspersão Térmica – Metalização**. Programa de Cursos Modulares em Tecnologia da Soldagem, ABS, 1993, 88p.

PAWLOWSKI, L. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings**. John Wiley & Sons Ltd, England, 1995, 414p.

PONTE, Haroldo de Araújo. **Apostila Fundamentos da Corrosão**. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Engenharia Química, 2003.

RIELLA, Humberto Gracher. **Apostila de Corrosão**. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos. Laboratório de Materiais e de Corrosão – LABMAC, 2018.

ROUND, M.J. **The training and certification of metal spraying protection inspectors**. Thermal Spraying, v. 6, p. 175 – 185, 1989.

SAMPSON, E. **Advances in Thermal Spray Coating Broaden Their Applications**. Welding Journal, AWS, V. 72, No. 7, 1993, pp. 39-41.

SCHATT, W., WORCH, H. **Ciência dos Materiais**. Editora Alemã para a Indústria Primária, Stuttgart, Alemanha, 1996.

SCHIEFLER Fo, M. F. D. O. **Estudo microestrutural e eletroquímico de revestimentos metálicos depositados por aspersão térmica**. 2004. 313 p. Tese de Doutorado - UFSC, Florianópolis, 2004.

SIS 055900:1967, Pictorial Surface Preparation Standards for Painting Steel Surface.

SOMOLEV, V.V., GUILMANY, J.M., **Investigation of coating porosity formation during high velocity oxy-fuel (hvof) spraying**. Material letters. V. 18, p. 304-308, 1994.

Sulzer Metco. **Metco Aluminium Wire**. Technical Bulletin. Outubro, 2000.

Sulzer Metco. **Metco Zinc Wire**. Technical Bulletin. Outubro, 2000.

SWIFT, K. G. **Seleção de processos de manufatura**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

TAIT, W. S. **An Introduction to Electrochemical Corrosion Testing for Practicing Engineers and Scientists**. PairODocs Publications, Racine, Wisconsin, USA, 1994, 138p.

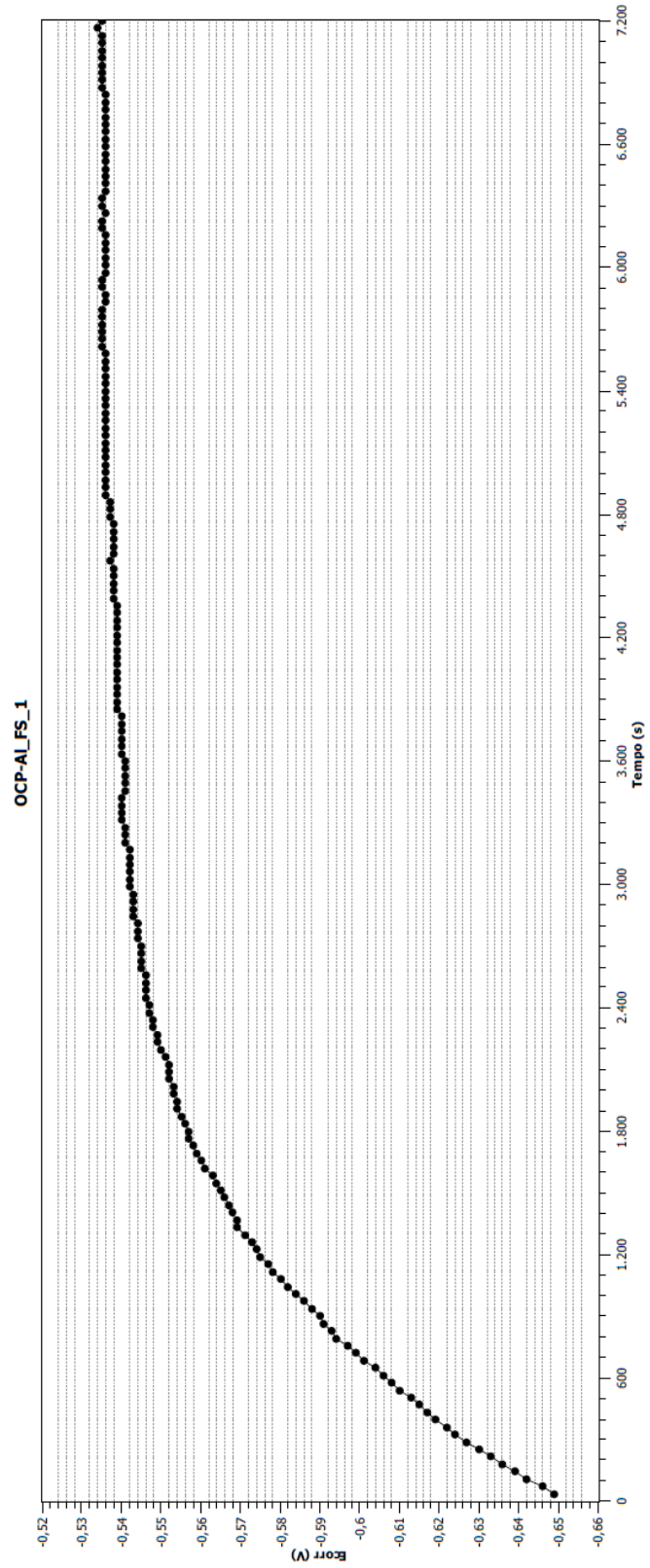
UREVICH, D. **The ABCs of Thermal Spraying**. The American Welder (a supplement to the Welding Journal), Nov.-Dec. 2000, pp. 16-18.

WANK, Andreas. **Basis of thermal spray technology**. Disponível em: <http://www.gtv-mbh.com/_old/gtv-mbh-englisch/www.gtv-Mbh.de/cms/upload/publikat/Wank/thermal_spray_basics_processes.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2017.

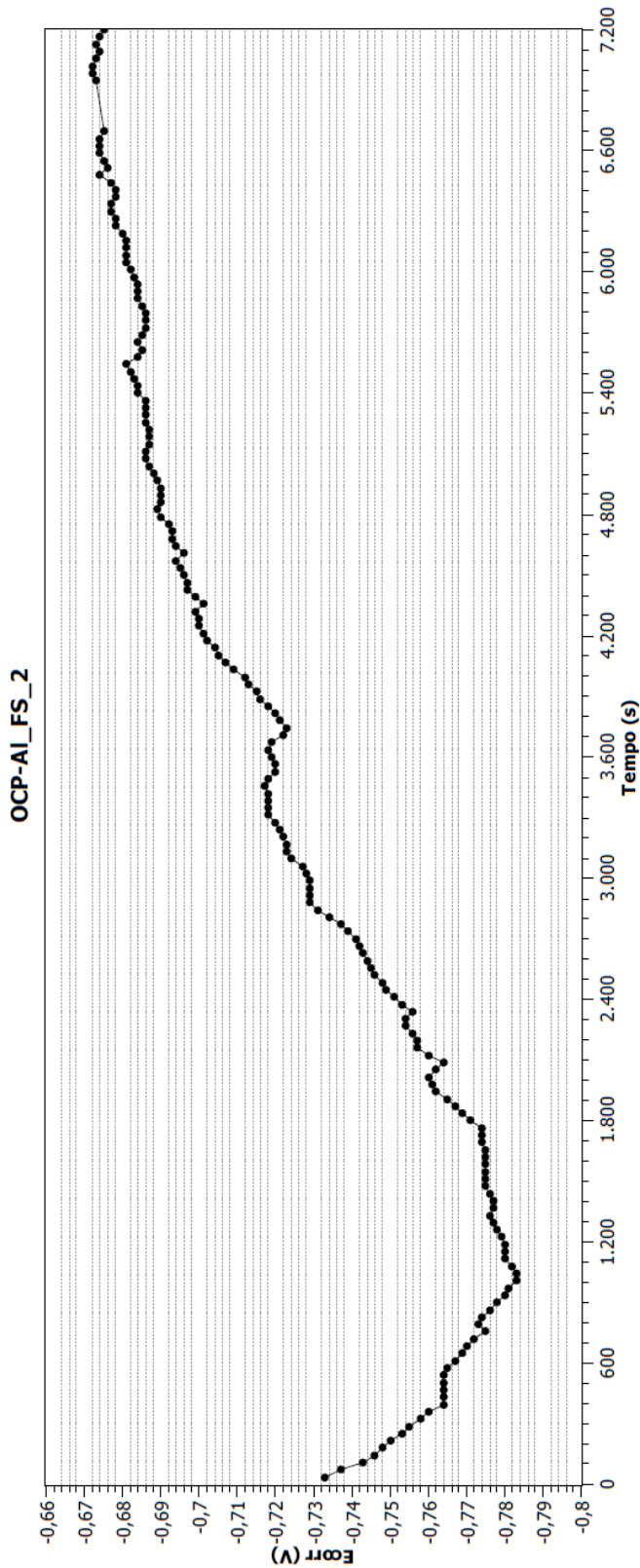
WELDING HANDBOOK. **Welding Processes**. American Welding Society, 8th Edition, 1991, Cap. 28.

ZHAO, L., MAURER, M., FISCHER, F., DICKS, R., LUGSCHEIDER, E. **Influence of spray parameters on the particle in-flight properties and the properties of HVOF coatings of wc-corc**. *Wear*. V. 257. 2004.

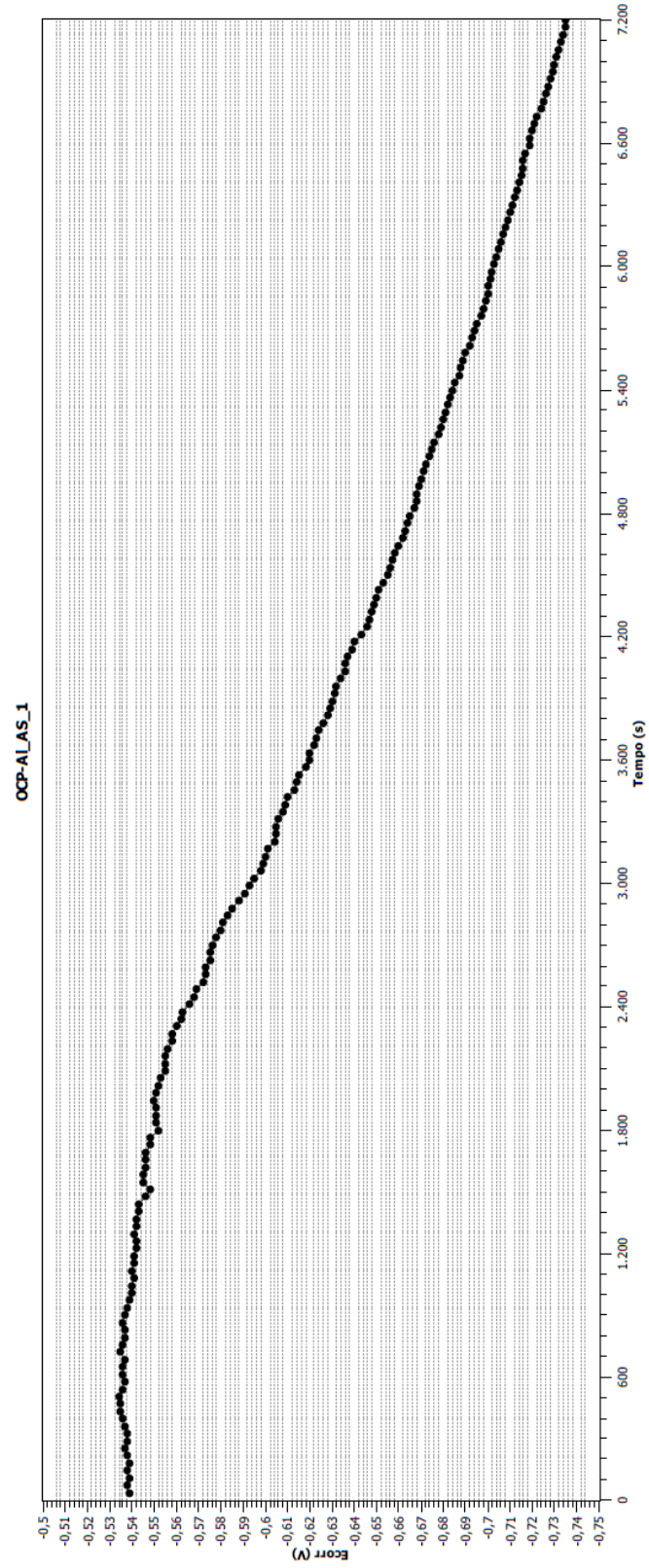
APÊNDICE A – GRÁFICO OCP PARA AL_FS_1



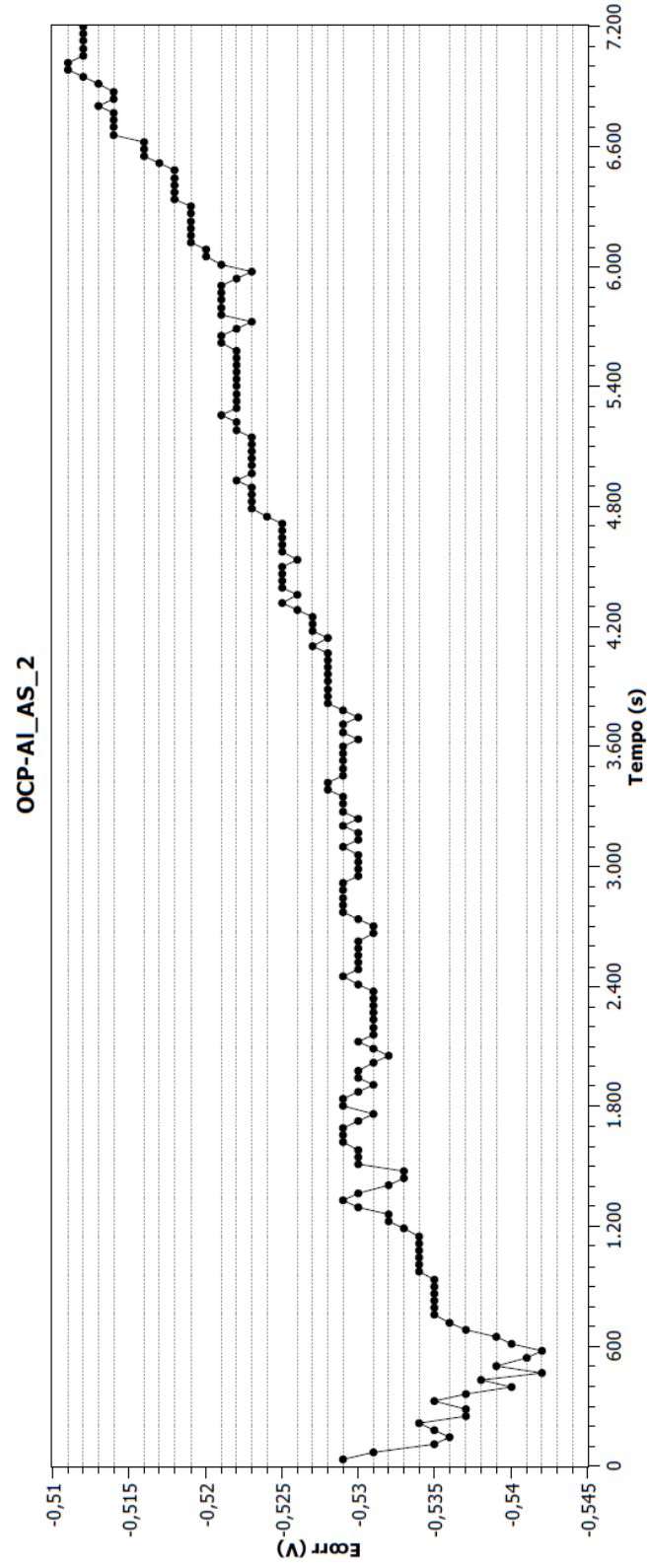
APÊNDICE B – GRÁFICO OCP PARA AL_FS_2



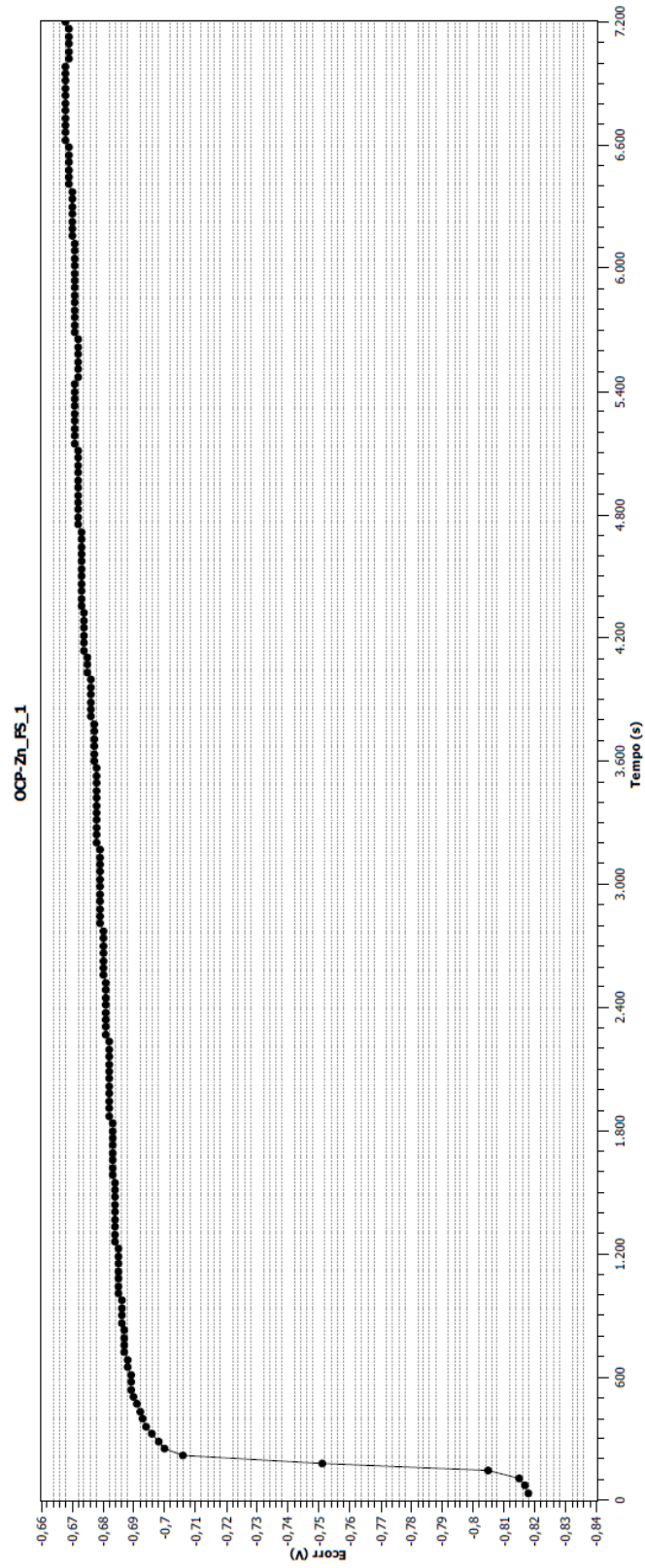
APÊNDICE C – GRÁFICO OCP PARA AL_AS_1



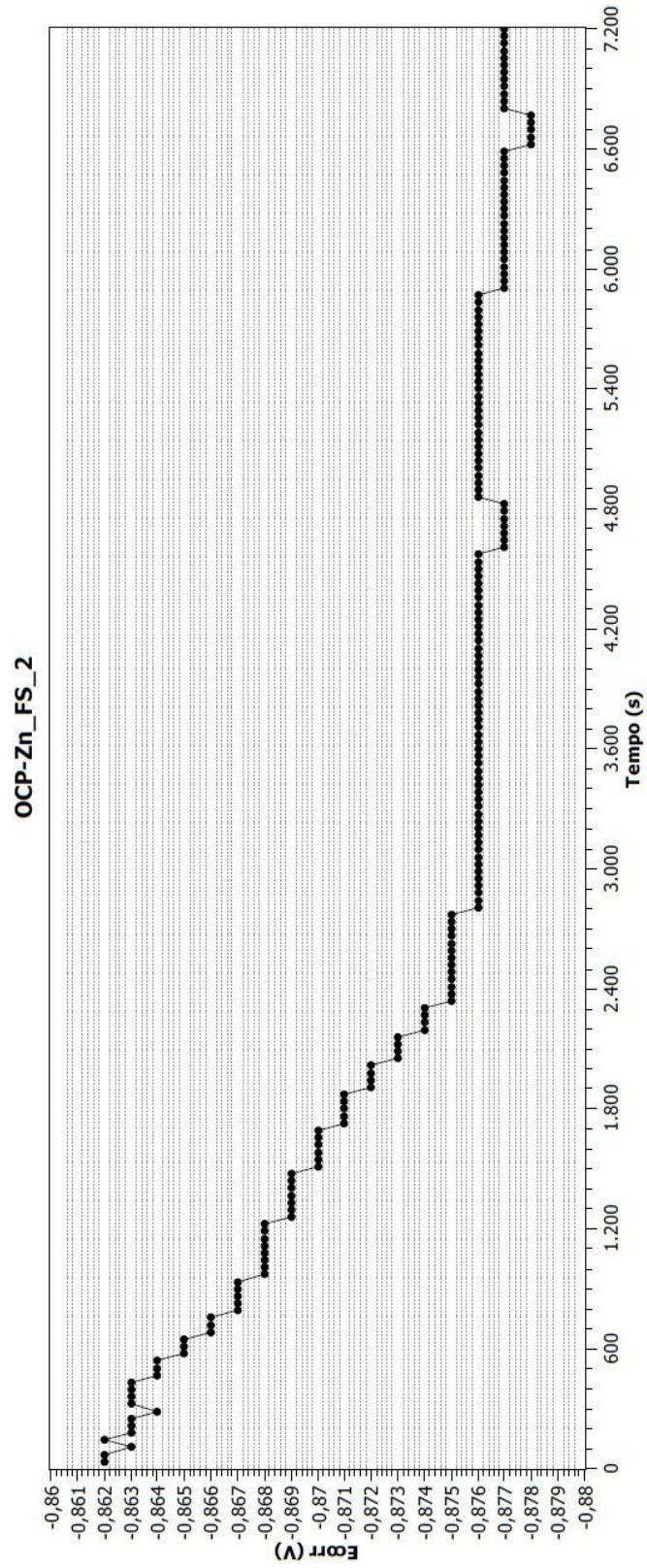
APÊNDICE D – GRÁFICO OCP PARA AL_AS_2



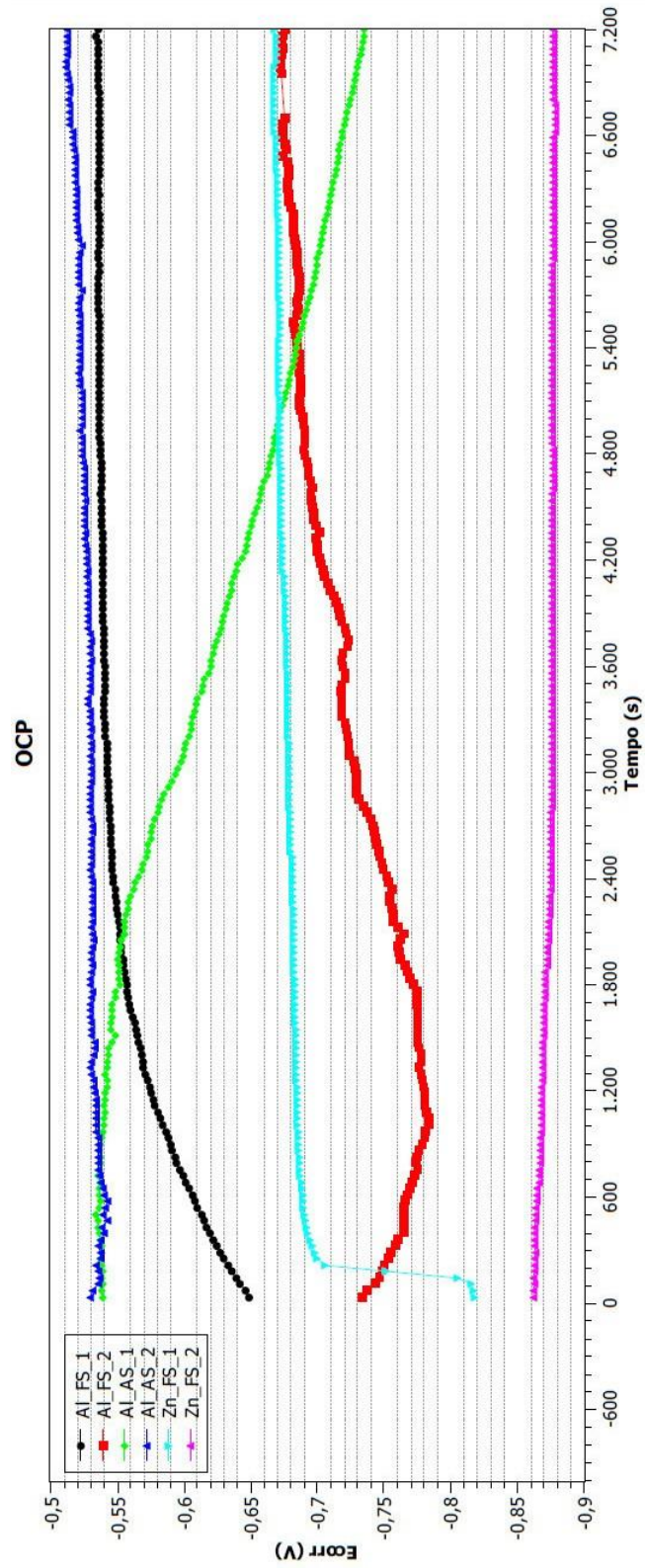
APÊNDICE E – GRÁFICO OCP PARA ZN_FS_1



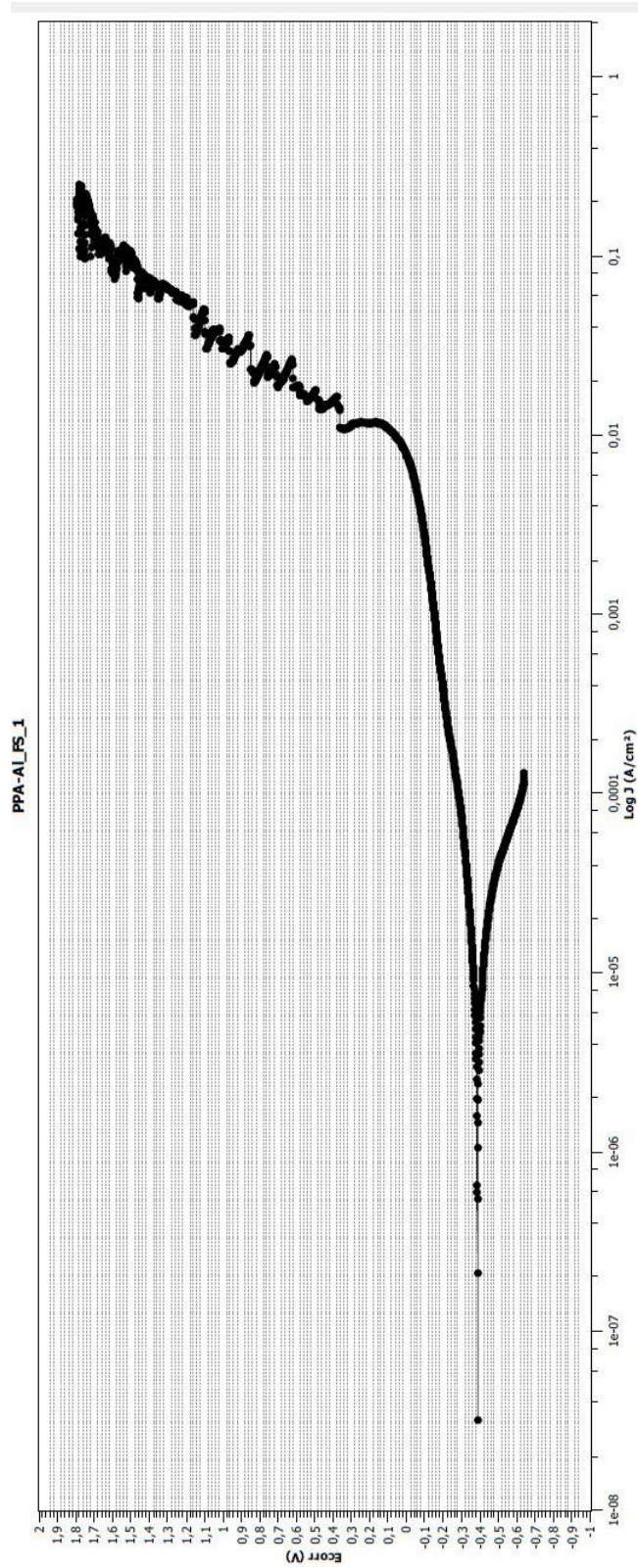
APÊNDICE F – GRÁFICO OCP PARA ZN_FS_2



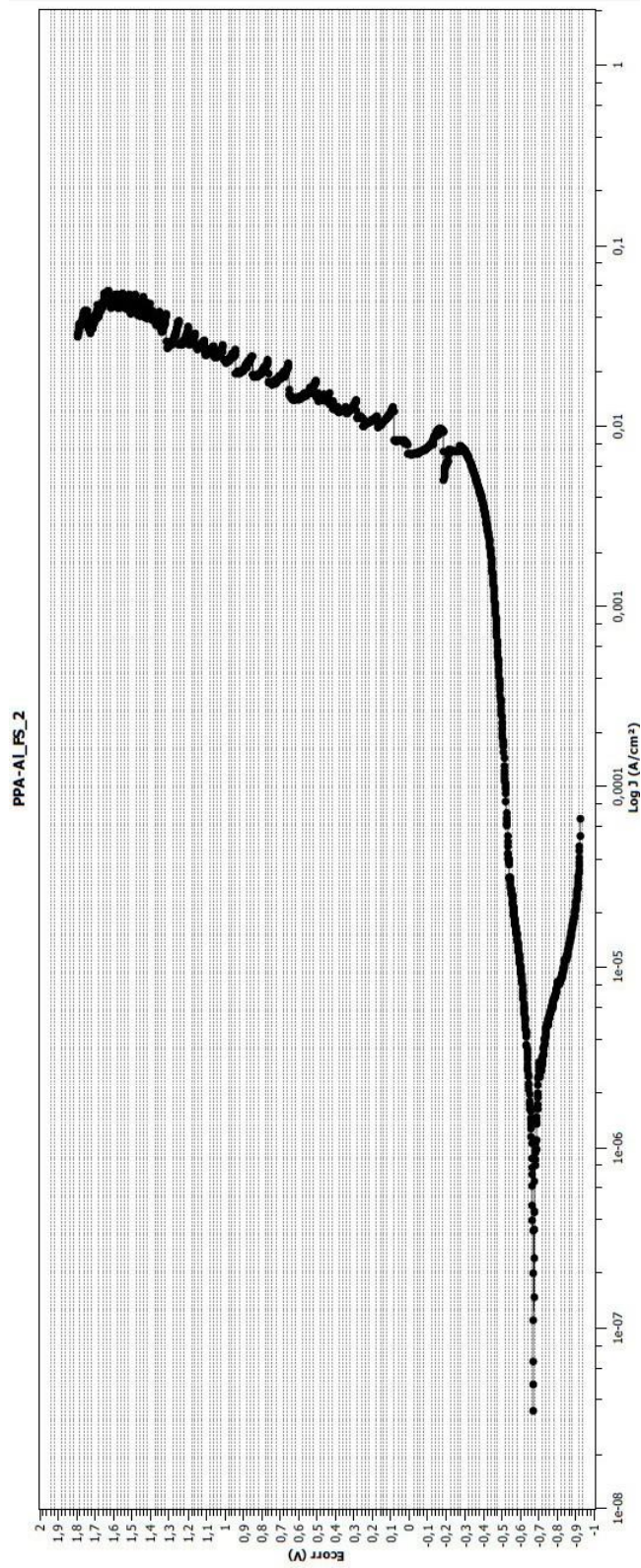
APÊNDICE G – GRÁFICO OCP PARA TODAS AS AMOSTRAS



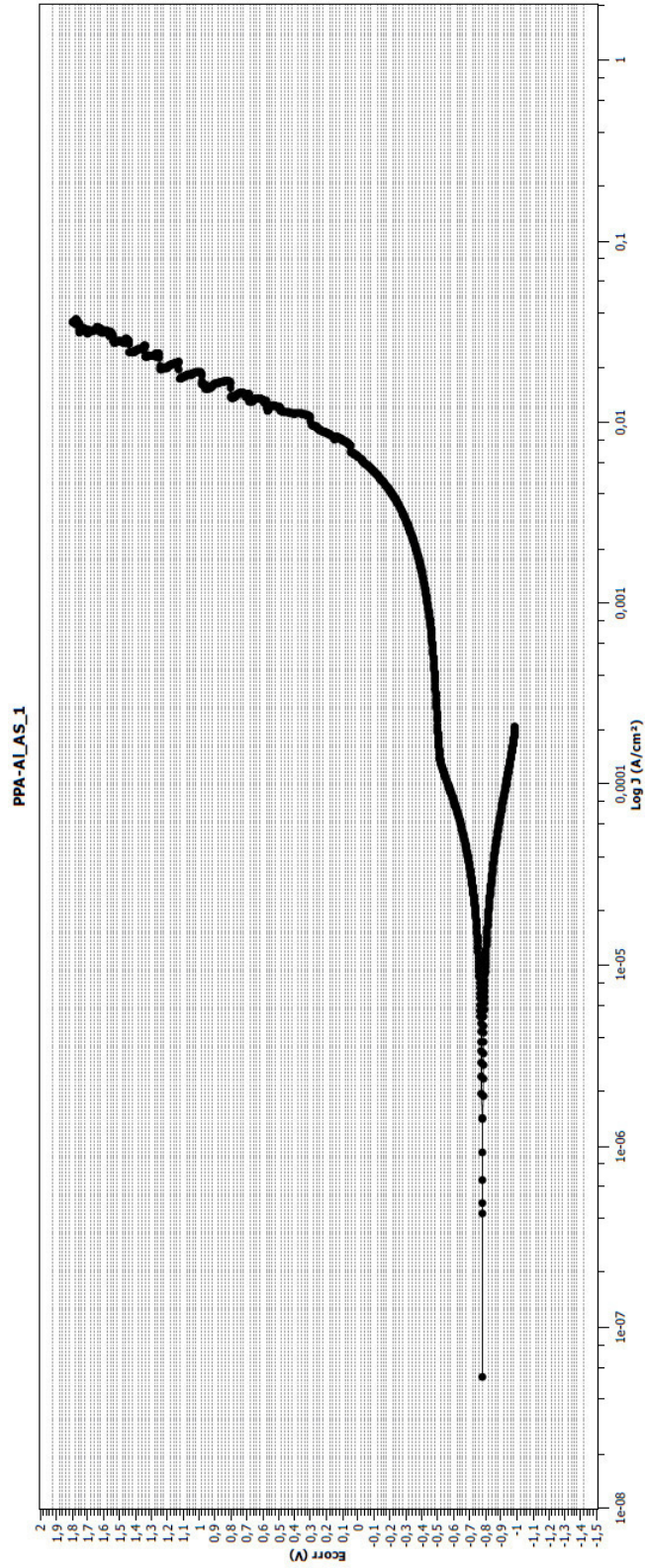
APÊNDICE H – GRÁFICO PPA PARA AL_FS_1



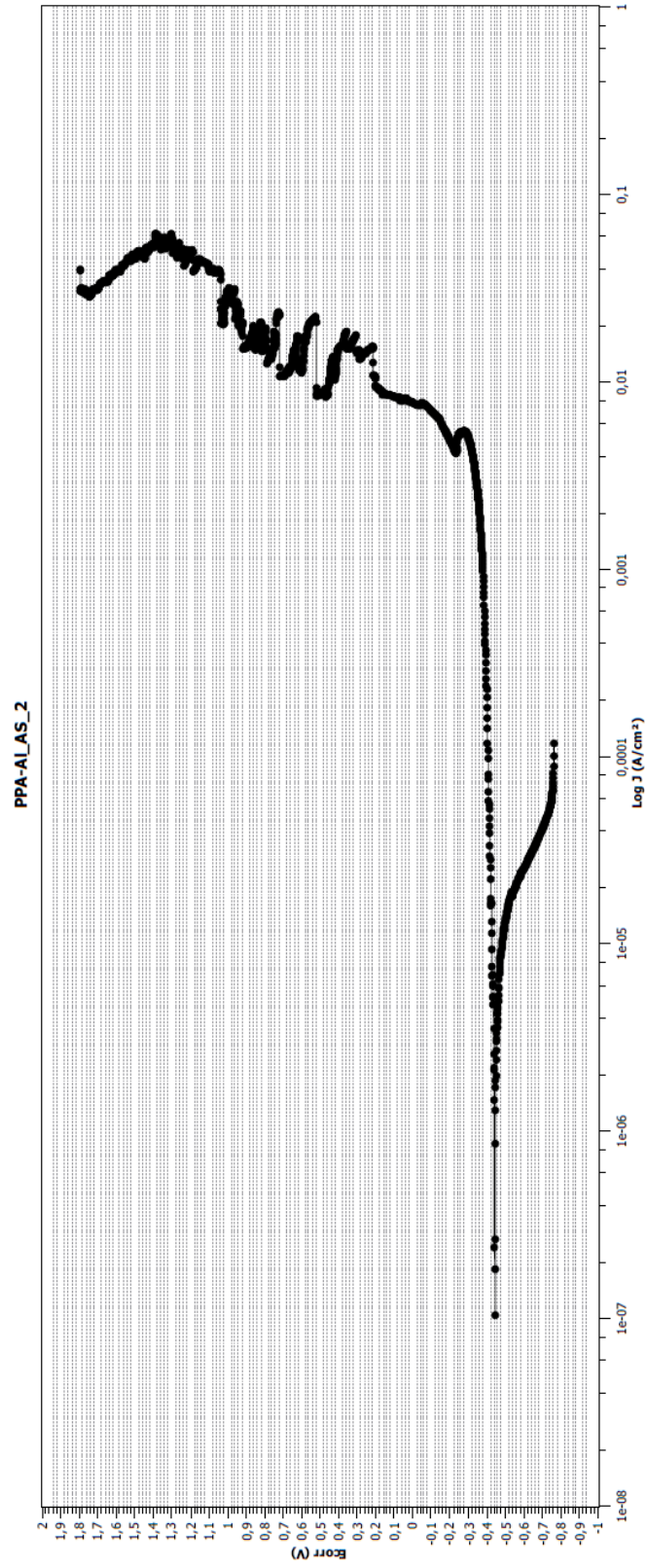
APÊNDICE I – GRÁFICO PPA PARA AL_FS_2



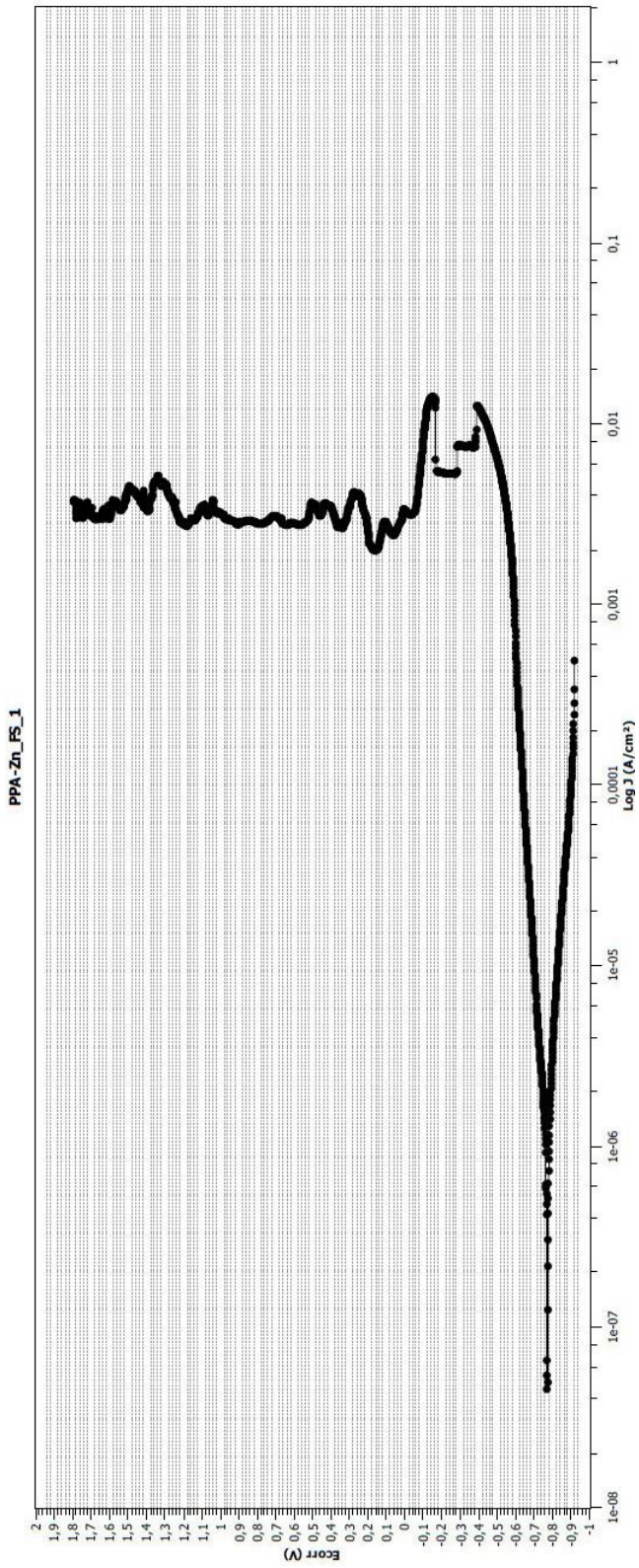
APÊNDICE J – GRÁFICO PPA PARA AL_AS_1



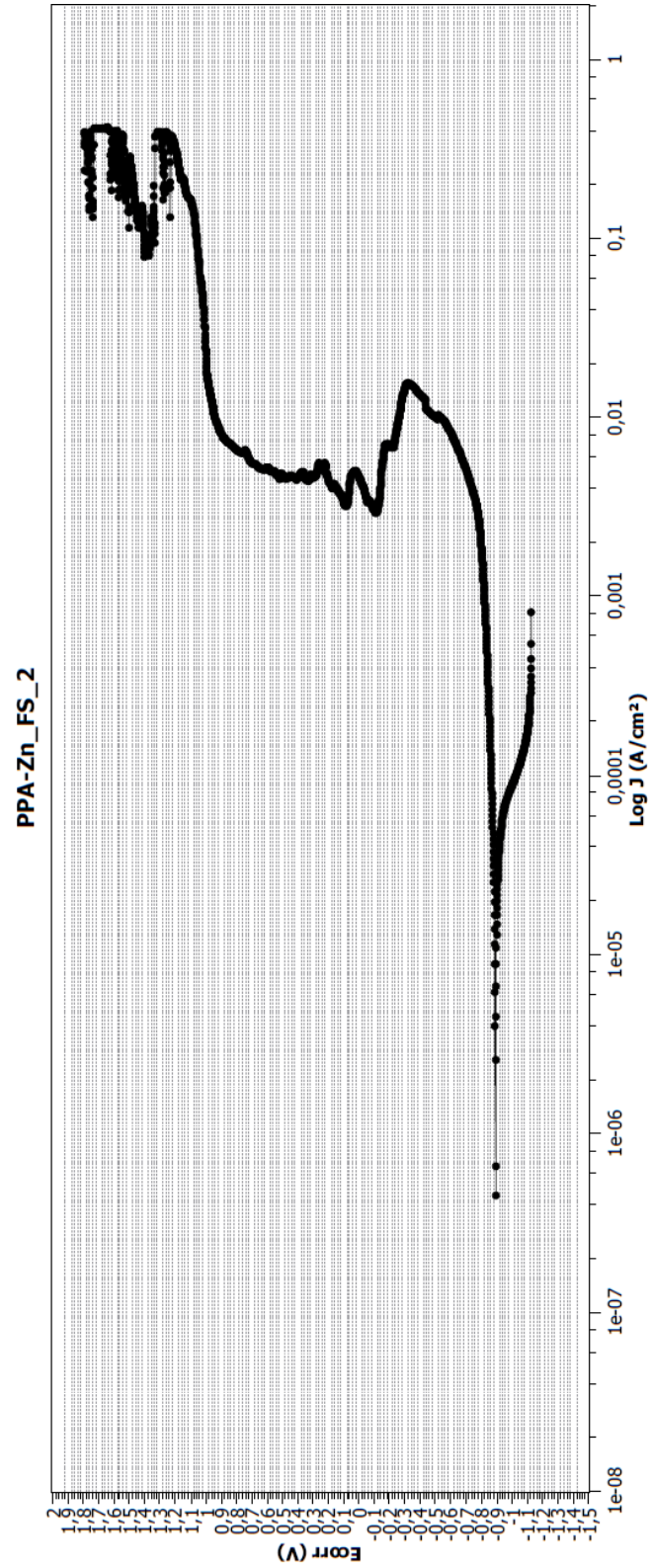
APÊNDICE K – GRÁFICO PPA PARA AL_AS_2



APÊNDICE L – GRÁFICO OCP PARA ZN_FS_1



APÊNDICE M – GRÁFICO PPA PARA ZN_FS_2



APÊNDICE N – GRÁFICO PPA PARA TODAS AS AMOSTRAS

